



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ (ΣΘΕΤ)

Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας

«ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ ΓΙΑ
ΓΕΩΡΓΙΚΟΥΣ ΣΚΟΠΟΥΣ»

«Σπηλιωτοπούλου Παναγιώτα»

Επιβλέπων καθηγητής: «Εκάβη Αικατερίνη Ίσαρη»

Πάτρα, «Ιούνιος» «2026»

© Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2026

Η παρούσα Εργασία καθώς και τα αποτελέσματα αυτής, αποτελούν συνιδιοκτησία του ΕΑΠ και της φοιτήτριας Σπηλιωτοπούλου Παναγιώτας, ο καθένας από τους οποίους έχει το δικαίωμα ανεξάρτητης χρήσης, αναπαραγωγής και αναδιανομής τους (στο σύνολο ή τμηματικά) για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, σε κάθε περίπτωση αναφέροντας τον τίτλο και το συγγραφέα της Εργασίας καθώς και το όνομα του ΕΑΠ όπου εκπονήθηκε.



«ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ ΓΙΑ
ΓΕΩΡΓΙΚΟΥΣ ΣΚΟΠΟΥΣ»

«Σπηλιωτοπούλου Παναγιώτα»

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

«Εκάβη Αικατερίνη Ίσαρη»

«Ιδιότητα & Ελληνικό Ανοικτό
Πανεπιστήμιο»

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

«Χρήστος Καρυδάς»

«Καθηγητής στο Ελληνικό Ανοικτό
Πανεπιστήμιο »

Πάτρα, «Ιούνιος» «2026»

Ευχαριστίες

*Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κ. **Τσαρη Εκάβη**, για την ανάθεση του θέματος της παρούσας πτυχιακής εργασίας, την καθοδήγηση, την επιστημονική υποστήριξη και το αμέριστο ενδιαφέρον που επέδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Οι πολύτιμες συμβουλές, οι εύστοχες παρατηρήσεις και η διαρκής υποστήριξή της συνέβαλαν ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης.*

*Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. **Καρυδά Χρήστο**, μέλος της εξεταστικής επιτροπής, για τον χρόνο που διέθεσε και τη συμμετοχή του στην αξιολόγηση της εργασίας.*

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου και τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου, για την υπομονή, την ενθάρρυνση και την αμέριστη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η αυξανόμενη ζήτηση νερού, σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή, την πληθυσμιακή αύξηση και την εντατικοποίηση της γεωργικής παραγωγής, επιτείνει το πρόβλημα της λειψυδρίας σε πολλές περιοχές του κόσμου. Δεδομένου ότι η γεωργία αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή γλυκού νερού, η αξιοποίηση εναλλακτικών υδατικών πόρων καθίσταται αναγκαία για τη βιώσιμη διαχείριση των διαθέσιμων αποθεμάτων. Στο πλαίσιο αυτό, η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων αναδεικνύεται ως μία σημαντική λύση για την κάλυψη αρδευτικών αναγκών και την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας. Η παρούσα εργασία εξετάζει τη δυνατότητα αξιοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στη γεωργία μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης και ανάλυσης του θεσμικού πλαισίου. Παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες επαναχρησιμοποίησης, οι τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων και οι σύγχρονες προηγμένες μέθοδοι, όπως οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών, η αντίστροφη ώσμωση, η νανοδιήθηση, οι προηγμένες οξειδωτικές διεργασίες και οι λύσεις βασισμένες στη φύση. Παράλληλα, αναλύονται τα οφέλη και οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης στη γεωργία, καθώς και οι απαιτήσεις ποιότητας του ανακτημένου νερού. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο ισχύον νομοθετικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Ελλάδας, με αναφορά στον Κανονισμό (ΕΕ) 2020/741 και στις απαιτήσεις που θέτει για την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση υδάτων. Επιπλέον, εξετάζονται διεθνείς πρακτικές εφαρμογής και παρουσιάζεται βιβλιομετρική ανάλυση της σχετικής επιστημονικής βιβλιογραφίας. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων, υπό την προϋπόθεση εφαρμογής κατάλληλων τεχνολογιών επεξεργασίας, αποτελεσματικής παρακολούθησης και συμμόρφωσης με τις ισχύουσες κανονιστικές απαιτήσεις.

Λέξεις-κλειδιά: Επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων, επαναχρησιμοποίηση νερού, ανακτημένο νερό, επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, άρδευση, γεωργία.

Abstract

Increasing water demand, combined with climate change, population growth, and the intensification of agricultural production, has exacerbated water scarcity in many regions of the world. Since agriculture is the largest consumer of freshwater resources, the use of alternative water sources has become essential for the sustainable management of available water supplies. In this context, the reuse of treated wastewater has emerged as a promising solution for meeting irrigation demands while supporting the principles of the circular economy. This thesis investigates the potential of treated wastewater reuse in agriculture through a comprehensive literature review and an analysis of the relevant regulatory framework. The study presents the main categories of water reuse, conventional wastewater treatment technologies, and advanced treatment methods, including membrane bioreactors, reverse osmosis, nanofiltration, advanced oxidation processes, and nature-based solutions. In addition, the benefits and risks associated with agricultural wastewater reuse are examined, together with the quality requirements for reclaimed water. Particular emphasis is placed on the current legislative framework of the European Union and Greece, with special reference to Regulation (EU) 2020/741 and the requirements it establishes for the safe reuse of water. Furthermore, international reuse practices are reviewed, and a bibliometric analysis of the relevant scientific literature is conducted. The findings indicate that treated wastewater reuse can contribute significantly to the sustainable management of water resources, provided that appropriate treatment technologies, effective monitoring systems, and compliance with existing regulatory requirements are ensured.

Keywords: wastewater reuse, water reuse, reclaimed water, treated wastewater, irrigation, agriculture.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
Κατάλογος Εικόνων	9
Κατάλογος Σχημάτων	10
Κατάλογος Πινάκων	11
1. Εισαγωγή	12
1.1 Το παγκόσμιο πρόβλημα της έλλειψης νερού	12
1.2 Η σημασία της γεωργίας στην κατανάλωση υδατικών πόρων	13
1.3 Εναλλακτικές πηγές νερού	13
1.4 Σκοπός, στόχοι και μεθοδολογία	14
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	16
2.1 Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στη γεωργία	16
2.1.1 Ορισμοί και κατηγορίες επαναχρησιμοποίησης	16
2.2 Τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων για γεωργική χρήση	16
2.2.1 Πρωτοβάθμια επεξεργασία	17
2.2.2 Δευτεροβάθμια επεξεργασία	18
2.2.3 Τριτοβάθμια επεξεργασία	19
2.2.4 Προηγμένες Τεχνολογίες Επεξεργασίας Αποβλήτων	19
2.3 Κίνδυνοι και οφέλη της επαναχρησιμοποίησης αποβλήτων στη γεωργία	29
2.3.1 Υγειονομικοί κίνδυνοι	30
2.3.2 Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι	30
2.3.3 Οικονομικοί και κοινωνικοί κίνδυνοι	30
2.3.4 Οφέλη για τη γεωργία και το περιβάλλον	31
Κεφάλαιο 3. Θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελλάδα	32
3.1 Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την επαναχρησιμοποίηση υδάτων και συγκριτική ανάλυση διεθνών προδιαγραφών	32
3.1.2 Απαιτήσεις παρακολούθησης	37
3.1.3 Προληπτικά μέτρα και «φραγμοί»	39
3.2 Γενική εικόνα των υδατικών πόρων στην Ελλάδα	40

3.3 Νομοθετικό πλαίσιο και ρυθμίσεις της επεξεργασίας λυμάτων στην Ελλάδα	41
3.3.1 Κατηγορίες επιτρεπόμενων χρήσεων.....	43
3.3.2 Ποιοτικές προδιαγραφές και τεχνικά κριτήρια.....	44
3.3.3 Αδειοδότηση, παρακολούθηση και έλεγχος.....	46
3.3.4 Υφιστάμενες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ)	47
3.4 Βαθμός αξιοποίησης επεξεργασμένων εκροών.....	49
3.5 Πειραματικές εφαρμογές επεξεργασμένων λυμάτων στην άρδευση καλλιεργειών και φυτοτοξικότητα.....	49
4. Διεθνείς πρακτικές επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων	53
4.1 Ιταλία	53
4.2 Ιορδανία	54
4.3 Γαλλία	57
4.4 Ισπανία.....	58
4.5 Ισραήλ.....	60
4.6 Σιγκαπούρη.....	61
4.7 Κύπρος	62
5. Βιβλιομετρική Ανάλυση και Συζήτηση	63
5.1 Χρονική εξέλιξη των επιστημονικών δημοσιεύσεων	63
5.2 Χαρτογράφηση και δικτύωση λέξεων-κλειδιών με χρήση του VOSviewer.....	63
5.3 Συζήτηση	66
Βιβλιογραφία	69

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Βιολογικός καθαρισμός Ηρακλείου, Πηγή : (Kanteraki et al., 2025)	17
Εικόνα 2 Αεροφωτογραφία του συστήματος τεχνητών υδροβιοτόπων Arcata Marsh & wildlife Sanctuary, με απεικόνιση των επιμέρους σταδίων επεξεργασίας των λυμάτων. Πηγή: Friends of Arcata Marsh. (n.d.) Sustainable water treatment: A conventional and a natural treatment system. https://www.arcatamarshfriends.org/wp-content/uploads/wastewater-brochure.pdf	27
Εικόνα 3 Κίνδυνοι της επαναχρησιμοποίησης υγρών αποβλήτων στη γεωργία	29

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1 Εξέλιξη του αριθμού των δημοσιεύσεων σχετικά με τις λέξεις - κλειδιά στις οποίες βασίστηκε η βιβλιομετρική ανασκόπηση της παρούσας εργασίας (Scopus).....	63
Σχήμα 2 Δίκτυο συνεμφάνισης λέξεων-κλειδιών της βιβλιογραφίας σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων για γεωργικούς σκοπούς, όπως δημιουργήθηκε με το λογισμικό VOSviewer.	65

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Συγκριτική αξιολόγηση προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας.....	27
Πίνακας 2 Κατηγορίες ποιότητας ανακτημένου νερού για γεωργική επαναχρησιμοποίηση σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΕ) 2020/741 Πηγή: Προσαρμογή από το ΦΕΚ Β΄ 354/08.03.2011 περί επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων.	33
Πίνακας 3 Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις των χημικών στοιχείων των ανακτημένων υγρών αποβλήτων που προορίζονται για επαναχρησιμοποίηση (παράρτημα II / Κ.Υ.Α. 145116/2011).	35
Πίνακας 4 Ελάχιστες συχνότητες συνήθους παρακολούθησης..... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
Πίνακας 5 Στόχοι επίδοσης για παρακολούθηση επικύρωσης (Κατηγορία Α)	44
Πίνακας 6 Ενδεικτικά ειδικά προληπτικά μέτρα.....	46
Πίνακας 7 Όρια ποιότητας και απαιτήσεις επεξεργασίας ανακτημένου νερού για διαφορετικές χρήσεις επαναχρησιμοποίησης σύμφωνα με την ΚΥΑ 145116/2011 Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
Πίνακας 8 Οριακές τιμές αζώτου και απαιτήσεις επεξεργασίας για εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων σύμφωνα με την ΚΥΑ 145116/2011	37
Πίνακας 9 Ποσότητες επαναχρησιμοποίησης και εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων ανά μονάδα επεξεργασίας λυμάτων.....	38
Πίνακας 10 Οι σημαντικότερες λέξεις-κλειδιά της βιβλιογραφίας βάση της συχνότητας εμφάνισης.....	39

1. Εισαγωγή

1.1 Το παγκόσμιο πρόβλημα της έλλειψης νερού

Η διαθεσιμότητα γλυκού νερού αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ανθρώπινη επιβίωση, την οικονομική ανάπτυξη και τη διατήρηση των φυσικών οικοσυστημάτων. Παρά το γεγονός ότι ο πλανήτης καλύπτεται σε μεγάλο βαθμό από νερό, λιγότερο από το 2,5% αυτού αποτελεί γλυκό νερό, ενώ μόνο ένα μικρό ποσοστό είναι άμεσα διαθέσιμο για ανθρώπινη χρήση (Shin et al., 2020). Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η έλλειψη νερού έχει αναδειχθεί σε ένα από τα σημαντικότερα παγκόσμια περιβαλλοντικά προβλήματα, επηρεάζοντας τόσο ανεπτυγμένες όσο και αναπτυσσόμενες χώρες.

Η παγκόσμια ζήτηση νερού αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό από την αύξηση του πληθυσμού, γεγονός που αποδίδεται στην αστικοποίηση, τη βιομηχανική ανάπτυξη και την εντατικοποίηση της γεωργίας (The State of Food and Agriculture, 2020). Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας και τα Ηνωμένα Έθνη, περισσότεροι από δύο δισεκατομμύρια άνθρωποι ζουν σήμερα σε περιοχές που αντιμετωπίζουν υψηλό επίπεδο υδατικής έλλειψης, ενώ περίπου τέσσερα δισεκατομμύρια άνθρωποι βιώνουν σοβαρή λειψυδρία για τουλάχιστον έναν μήνα κάθε χρόνο (Organisation mondiale de la santé, 2017).

Η κλιματική αλλαγή επιδεινώνει περαιτέρω το πρόβλημα της έλλειψης νερού, καθώς επηρεάζει άμεσα τον υδρολογικό κύκλο. Η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας, η μεταβολή των προτύπων βροχόπτωσης και η συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως παρατεταμένες ξηρασίες και έντονες πλημμύρες, οδηγούν σε μείωση της αξιοπιστίας των υδατικών πόρων (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2023).

Παράλληλα με τη μείωση της ποσότητας, παρατηρείται και υποβάθμιση της ποιότητας των υδατικών πόρων. Η απόρριψη ανεπεξέργαστων ή ανεπαρκώς επεξεργασμένων αστικών και βιομηχανικών λυμάτων, καθώς και η διάχυτη ρύπανση από τη γεωργία, μειώνουν σημαντικά τα διαθέσιμα αποθέματα κατάλληλου νερού (Guerreiro et al., 2018). Ως αποτέλεσμα, το πρόβλημα της έλλειψης νερού δεν περιορίζεται μόνο στη φυσική διαθεσιμότητα, αλλά επεκτείνεται και στη δυνατότητα ασφαλούς χρήσης του.

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει το ζήτημα της λειψυδρίας στις μεσογειακές χώρες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από έντονη εποχικότητα βροχοπτώσεων, υψηλές θερμοκρασίες κατά τους θερινούς μήνες και αυξημένες ανάγκες άρδευσης. Στο πλαίσιο αυτό, η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων και η αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών νερού καθίστανται κρίσιμες για τη βιώσιμη ανάπτυξη.

1.2 Η σημασία της γεωργίας στην κατανάλωση υδατικών πόρων

Η γεωργία αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή γλυκού νερού παγκοσμίως, απαιτώντας περίπου το 70% των συνολικών υδατικών απολήξεων (*The State of Food and Agriculture*, 2020). Σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, το ποσοστό αυτό υπερβαίνει το 80%, γεγονός που καταδεικνύει τη στενή σχέση μεταξύ αγροτικής παραγωγής και υδατικών πόρων. Η άρδευση των καλλιεργειών είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της επισιτιστικής επάρκειας, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένες βροχοπτώσεις.

Η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση τροφίμων, σε συνδυασμό με την αλλαγή των διατροφικών συνηθειών και την αύξηση του πληθυσμού, αναμένεται να εντείνει περαιτέρω την πίεση στους υδατικούς πόρους (UNESCO, 2017). Σε πολλές γεωργικές εκμεταλλεύσεις, εφαρμόζονται παραδοσιακές μέθοδοι άρδευσης, όπως η επιφανειακή κατάκλυση, οι οποίες χαρακτηρίζονται από χαμηλή αποδοτικότητα και σημαντικές απώλειες νερού. Οι απώλειες αυτές οφείλονται κυρίως στην εξάτμιση, την επιφανειακή απορροή και τη βαθιά διήθηση, με αποτέλεσμα τη μειωμένη αξιοποίηση του νερού από τις καλλιέργειες. Η εκτεταμένη χρήση υπόγειων υδροφορέων για αρδευτικούς σκοπούς έχει οδηγήσει σε σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η πτώση της στάθμης των υπόγειων υδάτων, η υφαλμύριση σε παράκτιες περιοχές και την υποβάθμιση του εδάφους. Τα φαινόμενα αυτά απειλούν τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της γεωργικής παραγωγής και καθιστούν αναγκαία την αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών (Werner et al., 2013).

1.3 Εναλλακτικές πηγές νερού

Η αυξανόμενη υδατική έλλειψη έχει καταστήσει αναγκαία την αναζήτηση εναλλακτικών και μη συμβατικών πηγών νερού στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης διαχείρισης υδατικών πόρων. Μεταξύ

των κυριότερων επιλογών συγκαταλέγονται η αφαλάτωση, η συλλογή όμβριων υδάτων και η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων (Angelakis & Gikas, 2014).

Η επαναχρησιμοποίηση αστικών λυμάτων παρουσιάζει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα, καθώς προσφέρει μια σταθερή και προβλέψιμη πηγή νερού, ανεξάρτητη από τις κλιματικές διακυμάνσεις. Η παραγωγή αστικών λυμάτων συνδέεται άμεσα με την ανθρώπινη δραστηριότητα και παραμένει σχετικά σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, γεγονός που καθιστά την επαναχρησιμοποίηση ιδιαίτερα ελκυστική για τη γεωργική άρδευση (Asano et al., 2007).

Επιπλέον, τα επεξεργασμένα λύματα περιέχουν σημαντικές ποσότητες θρεπτικών στοιχείων, όπως άζωτο και φώσφορο, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν από τις καλλιέργειες. Η αξιοποίηση αυτή μπορεί να μειώσει την ανάγκη για χημικά λιπάσματα, συμβάλλοντας τόσο στη μείωση του κόστους παραγωγής όσο και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τη χρήση τους (Lazarova & Bahri, 2015).

1.4 Σκοπός, στόχοι και μεθοδολογία

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η εις βάθος διερεύνηση της επαναχρησιμοποίησης αστικών λυμάτων για γεωργικούς σκοπούς, με έμφαση στις τεχνολογίες επεξεργασίας, τα ποιοτικά κριτήρια, το θεσμικό πλαίσιο και τις εφαρμογές στην Ελλάδα και διεθνώς.

Οι βασικοί στόχοι της εργασίας περιλαμβάνουν:

1. την **ανάλυση των διαθέσιμων τεχνολογιών επεξεργασίας υγρών αποβλήτων**
2. την **αξιολόγηση των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών οφελών και κινδύνων της επαναχρησιμοποίησης**, καθώς και
3. τη **διατύπωση τεκμηριωμένων προτάσεων** για την ενίσχυση της εφαρμογής της στην Ελλάδα.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία βασίζεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας, με στόχο τη συλλογή, ανάλυση και σύνθεση των πλέον αξιόπιστων και πρόσφατων δεδομένων σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση

επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στη γεωργία. Η αναζήτηση επιστημονικών πηγών πραγματοποιήθηκε σε διεθνείς βάσεις δεδομένων υψηλής εγκυρότητας, όπως Scopus, Web of Science, ScienceDirect και Google Scholar, καλύπτοντας τη χρονική περίοδο από το 2010 έως και το 2026.

Για τη βιβλιομετρική ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό VOSviewer, με στόχο τη χαρτογράφηση της συνεμφάνισης λέξεων-κλειδιών (keyword co-occurrence analysis). Οι λέξεις-κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν περιλάμβαναν τους όρους *wastewater reuse*, *water reuse*, *reclaimed water*, *treated wastewater*, *wastewater reclamation*, *irrigation* και *agriculture*. Το τελικό σύνολο των λέξεων-κλειδιών καθορίστηκε με την χρήση φίλτρων ως προς τη συνάφεια, τη διατήρηση κοινής ορολογίας και την απομάκρυνση διπλών ή μη σχετικών όρων, καταλήγοντας σε 150 λέξεις-κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση στο VOSviewer.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στη γεωργία

2.1.1 Ορισμοί και κατηγορίες επαναχρησιμοποίησης

Η επαναχρησιμοποίηση νερού ορίζεται ως η εσκεμμένη και ελεγχόμενη χρήση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για συγκεκριμένες ωφέλιμες χρήσεις, όπως η γεωργική άρδευση, η βιομηχανική χρήση, η αστική αναψυχή και ο εμπλουτισμός υπόγειων υδροφόρων (Asano et al., 2007). Η πρακτική αυτή αποτελεί βασικό στοιχείο της ολοκληρωμένης διαχείρισης υδατικών πόρων και εντάσσεται στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, όπου τα απόβλητα αντιμετωπίζονται ως πόροι.

Η επαναχρησιμοποίηση διακρίνεται σε άμεση και έμμεση. Στην άμεση επαναχρησιμοποίηση, τα επεξεργασμένα λύματα οδηγούνται απευθείας στον τελικό χρήστη, όπως στις αρδευόμενες καλλιέργειες. Αντίθετα, στην έμμεση επαναχρησιμοποίηση, τα επεξεργασμένα λύματα απορρίπτονται πρώτα σε υδάτινους αποδέκτες ή υδροφορείς και στη συνέχεια επαναχρησιμοποιούνται μετά από φυσική αραίωση και περαιτέρω επεξεργασία (A. Angelakis & Gikas, 2014). Οι κατηγορίες επαναχρησιμοποίησης καθορίζονται με βάση την τελική χρήση του νερού. Στη γεωργία, η επαναχρησιμοποίηση αφορά κυρίως την άρδευση καλλιεργειών βρώσιμων και μη φυτικών ειδών, καθώς και ενεργειακών καλλιεργειών. Οι απαιτήσεις ποιότητας διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας, τη μέθοδο άρδευσης και τον βαθμό επαφής του νερού με τον άνθρωπο (Organisation mondiale de la santé, 2006).

2.2 Τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων για γεωργική χρήση

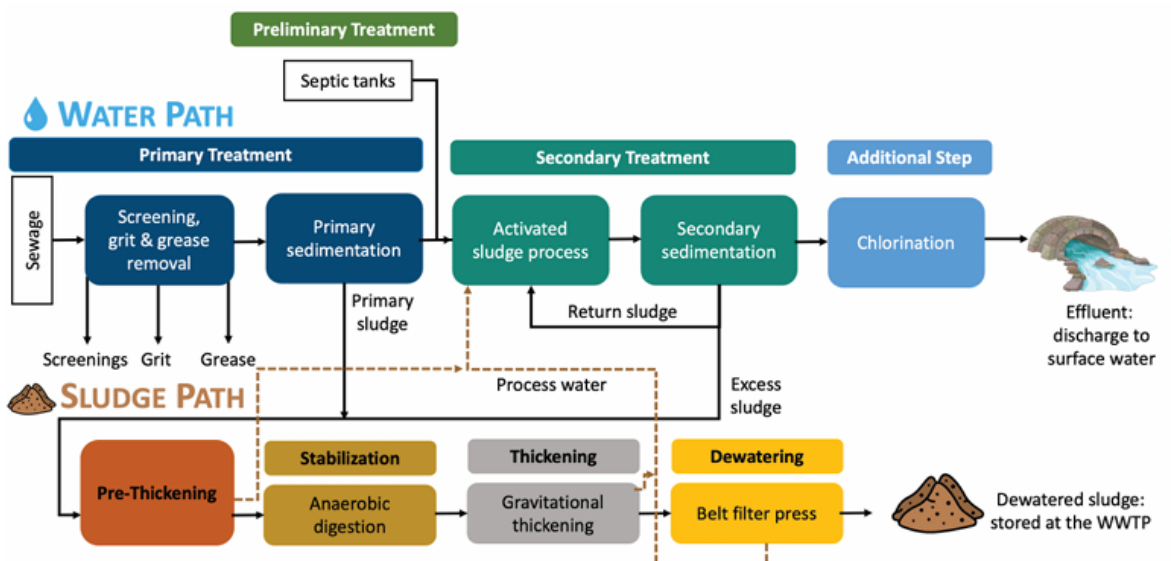
Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας επεξεργασίας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφαλή και αποδοτική επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων στη γεωργία. Οι τεχνολογίες επεξεργασίας στοχεύουν στην απομάκρυνση οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών, παθογόνων μικροοργανισμών και θρεπτικών στοιχείων, ανάλογα με τις απαιτήσεις ποιότητας της τελικής χρήσης. Τα επίπεδα επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων σε κέντρα επεξεργασίας λυμάτων (ΚΕΛ) διακρίνονται σε πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια, ενώ τα τελευταία χρόνια εφαρμόζονται και προχωρημένες τεχνολογίες επεξεργασίας. Κάθε επίπεδο αποσκοπεί στην

απομάκρυνση συγκεκριμένων ρυπαντών και στη βελτίωση της ποιότητας του νερού, ώστε να καταστεί ασφαλές και κατάλληλο για την εκάστοτε χρήση.

2.2.1 Πρωτοβάθμια επεξεργασία

Η πρωτοβάθμια επεξεργασία αποτελεί το πρώτο στάδιο κατεργασίας των αστικών λυμάτων και περιλαμβάνει φυσικές διεργασίες, όπως εσχάρωση, απολίπανση και πρωτοβάθμια καθίζηση (Εικόνα 1). Σκοπός της είναι η απομάκρυνση των χονδρόκοκκων στερεών και μέρους των αιωρούμενων στερεών και του οργανικού φορτίου.

Η πρωτοβάθμια επεξεργασία από μόνη της δεν επαρκεί για επαναχρησιμοποίηση στη γεωργία, καθώς το εξερχόμενο νερό εξακολουθεί να περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις παθογόνων μικροοργανισμών και οργανικών ρυπαντών. Ωστόσο, αποτελεί απαραίτητο στάδιο για τα επόμενα επίπεδα επεξεργασίας, μειώνοντας το φορτίο που δέχονται οι βιολογικές διεργασίες.



Εικόνα 1: Βιολογικός καθαρισμός Ηρακλείου, Πηγή : (Kanteraki et al., 2025)

2.2.2 Δευτεροβάθμια επεξεργασία

Η δευτεροβάθμια επεξεργασία βασίζεται σε βιολογικές διεργασίες, κατά τις οποίες μικροοργανισμοί αποδομούν το διαλυμένο και κολλοειδές οργανικό φορτίο των λυμάτων. Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες περιλαμβάνουν το σύστημα ενεργού ιλύος, τα βιολογικά φίλτρα και τις τεχνητές λίμνες σταθεροποίησης (Tchobanoglous et al., 2014).

Το σύστημα ενεργού ιλύος αποτελεί την πλέον διαδεδομένη τεχνολογία, λόγω της υψηλής απόδοσης και της δυνατότητας ελέγχου των λειτουργικών παραμέτρων. Μετά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Biochemical Oxygen Demand, BOD) και των αιωρούμενων στερεών, ωστόσο η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών καθιστά απαραίτητη την περαιτέρω επεξεργασία για γεωργική χρήση.

2.2.3 Τριτοβάθμια επεξεργασία

Η τριτοβάθμια επεξεργασία αποτελεί το τελικό στάδιο επεξεργασίας των λυμάτων και εφαρμόζεται με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας της εκροής πέραν των δυνατοτήτων της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. Στο στάδιο αυτό απομακρύνονται υπολειμματικά αιωρούμενα στερεά, θρεπτικά συστατικά (άζωτο και φώσφορος), παθογόνοι μικροοργανισμοί και άλλοι ρύποι που ενδέχεται να παραμένουν μετά τη βιολογική επεξεργασία. Οι συνηθέστερες διεργασίες περιλαμβάνουν τη διήθηση, την απολύμανση με χλώριο ή υπεριώδη ακτινοβολία (UV), καθώς και εξειδικευμένες διεργασίες απομάκρυνσης θρεπτικών συστατικών (Tchobanoglous et al., 2014).

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά η τριτοβάθμια επεξεργασία όταν η εκροή προορίζεται για επαναχρησιμοποίηση. Ο Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 θεσπίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις για την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση ανακτημένου νερού που προέρχεται από επεξεργασμένα αστικά λύματα και προορίζεται για γεωργική άρδευση. Ειδικότερα, καθορίζει πρότυπα ποιότητας, απαιτήσεις παρακολούθησης και διαδικασίες διαχείρισης κινδύνου, με στόχο την προστασία της δημόσιας υγείας, του περιβάλλοντος και την προώθηση της βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων (European Parliament & Council of the European Union, 2020). Η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις αυτές συχνά προϋποθέτει την εφαρμογή προηγμένων και συνδυαστικών τεχνολογιών επεξεργασίας, οι οποίες στοχεύουν όχι μόνο στην απομάκρυνση οργανικού φορτίου και παθογόνων μικροοργανισμών, αλλά και στον περιορισμό αναδιδόμενων ρύπων και άλλων μικροβιολογικών κινδύνων.

2.2.4 Προηγμένες Τεχνολογίες Επεξεργασίας Αποβλήτων

Τα απόβλητα των γεωργικών δραστηριοτήτων περιέχουν σημαντικές ποσότητες φυτοπροστατευτικών προϊόντων (ζιζανιοκτόνα, εντομοκτόνα, μυκητοκτόνα, ακαρεοκτόνα, νηματωδοκτόνα κ.α.), τα οποία αναγνωρίζονται ως αναδιδόμενοι επίμονοι ρύποι λόγω της τοξικότητας και της σταθερότητας τους στο περιβάλλον ακόμη και σε ιχνοποσότητες (Plakas & Karabelas, 2012; Prosser et al., 2020). Οι συμβατικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων δεν επαρκούν για την πλήρη απομάκρυνση αυτών των ανθεκτικών μικρορυπαντών, καθώς πολλά φυτοφάρμακα παραμένουν στην τελική εκροή (Nguyen et al., 2022). Οι τεχνολογίες αυτές, οι οποίες συνδυάζουν βιολογικές, χημικές και φυσικές διεργασίες αναλύονται παρακάτω.

2.2.4.1 Βιοαντιδραστήρες Μεμβρανών (MBR)

Οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (Membrane Bioreactors – MBR) αποτελούν προηγμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, τα οποία συνδυάζουν τη βιολογική επεξεργασία με τη διήθηση του ανάμικτου υγρού διαμέσου μεμβρανών, με σκοπό τον διαχωρισμό του από την επεξεργασμένη εκροή, όπως μικροδιήθηση (Microfiltration - MF) ή υπερδιήθηση (Ultrafiltration - UF). Στα συστήματα αυτά, η μεμβράνη λειτουργεί ως φυσικό φράγμα που συγκρατεί τα αιωρούμενα στερεά, τη βιομάζα και τους μικροοργανισμούς, επιτρέποντας την παραγωγή εκροής πολύ υψηλής ποιότητας με εξαιρετικά χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών (Total Suspended Solids - TSS), παθογόνων μικροοργανισμών και θρεπτικών συστατικών (Nguyen et al., 2022).

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των MBR είναι ο αυξημένος χρόνος παραμονής στερεών (Solids Retention Time - SRT), ο οποίος ευνοεί την ανάπτυξη εξειδικευμένων μικροβιακών πληθυσμών ικανών να αποδομούν σύνθετες οργανικές ενώσεις. Ως αποτέλεσμα, τα MBR παρουσιάζουν αυξημένη ικανότητα απομάκρυνσης ενός ευρύτερου φάσματος μικρορυπαντών, συμπεριλαμβανομένων φαρμακευτικών ενώσεων και ορισμένων φυτοφαρμάκων, σε σύγκριση με τις συμβατικές διεργασίες ενεργού ιλύος. Τα συστήματα MBR προσφέρουν εκροή εξαιρετικά υψηλής ποιότητας, καθιστώντας τα κατάλληλα για επαναχρησιμοποίηση νερού σε γεωργικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από μειωμένες απαιτήσεις χώρου εγκατάστασης σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα, λόγω της απουσίας δεξαμενών καθίζησης, και συνδυάζουν αποτελεσματικά τη βιολογική αποδόμηση με τον φυσικό διαχωρισμό μέσω μεμβρανών (Nguyen et al., 2022). Παρά τα πλεονεκτήματα, τα MBR παρουσιάζουν υψηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας, αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις λόγω της ανάγκης διατήρησης διαφορικής πίεσης στις μεμβράνες, καθώς και αυξημένη ευαισθησία σε φαινόμενα φραγής (fouling). Επίσης, η απομάκρυνση επίμονων οργανικών ρύπων, όπως πολλά φυτοφάρμακα και εντομοκτόνα με σταθερή χημική δομή, παραμένει συχνά μερική όταν τα MBR λειτουργούν ως αυτόνομα συστήματα. Πειραματικές και πιλοτικές μελέτες έχουν δείξει ότι ορισμένες ενώσεις διέρχονται από το σύστημα χωρίς ουσιαστική βιοαποδόμηση ή συγκράτηση από τη μεμβράνη, γεγονός που περιορίζει τη συνολική αποτελεσματικότητα της διεργασίας (Lopes et al., 2020). Για την αντιμετώπιση αυτού του περιορισμού, έχουν αναπτυχθεί υβριδικά συστήματα MBR σε συνδυασμό με πρόσθετες διεργασίες επεξεργασίας, όπως η προσρόφηση σε

ενεργό άνθρακα (Membrane Bioreactor/Activated Carbon - MBR/AC), η αντίστροφη ώσμωση (Membrane Bioreactor/Reverse Osmosis - MBR/RO) και η οζόνωση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης των Lopes et al. (2020), τα συστήματα MBR/AC και MBR/RO παρουσίασαν εξαιρετικά υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης οργανικών μικρορυπαντών, προσεγγίζοντας την πλήρη απομάκρυνση (>90–95%) σε βιομηχανικά και γεωργικά λύματα. Αντίθετα, ο συνδυασμός MBR με όζον εμφάνισε χαμηλότερη αποτελεσματικότητα όταν εφαρμόστηκαν χαμηλές δόσεις όζοντος, γεγονός που υποδεικνύει ότι η απόδοση της οζόνωσης εξαρτάται έντονα από τη δοσολογία και τις συνθήκες λειτουργίας.

Ως εκ τούτου, η συνολική αποδοτικότητα αφαίρεσης επίμονων οργανικών μικρορυπαντών χαρακτηρίζεται μέτρια έως υψηλή, ενώ σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται η προσθήκη συμπληρωματικού σταδίου επεξεργασίας για την επίτευξη πλήρους απομάκρυνσης τους (Lopes et al., 2020).

2.2.4.2 Αντίστροφη Ώσμωση (RO) και Νανοδιήθηση (NF)

Οι διεργασίες αντίστροφης ώσμωσης (Reverse Osmosis – RO) και νανοδιήθησης (Nanofiltration – NF) ανήκουν στις πλέον προηγμένες τεχνολογίες μεμβράνης επεξεργασίας νερού και λυμάτων και βασίζονται στην εφαρμογή υψηλής υδραυλικής πίεσης για τη διέλευση του νερού μέσω ημιπερατών μεμβρανών πολύ μικρού μεγέθους πόρων. Σε αντίθεση με τη μικροδιήθηση (Microfiltration, MF) και την υπερδιήθηση (Ultrafiltration, UF), οι οποίες απομακρύνουν κυρίως αιωρούμενα σωματίδια, κολλοειδή και μικροοργανισμούς, οι μεμβράνες αυτές είναι ικανές να συγκρατούν μεγάλο ποσοστό διαλυμένων οργανικών ενώσεων, συμπεριλαμβανομένων φυτοπροστατευτικών προϊόντων, καθώς και ανόργανων ιόντων και αλάτων, ανάλογα με τον τύπο της μεμβράνης (Plakas & Karabelas, 2012). Συγκεκριμένα, οι μεμβράνες RO παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλή ικανότητα απομάκρυνσης ουσιών με σχετικά μεγάλο μοριακό βάρος ή/και υδρόφοβο χαρακτήρα, όπως οργανικά χλωριωμένα ζιζανιοκτόνα και οργανοφωσφορικά εντομοκτόνα. Σύμφωνα με τους Plakas & Karabelas (2012), ποσοστά απόρριψης άνω του 95% είναι συχνά για πληθώρα δραστικών ουσιών, ενώ σε συγκεκριμένες πειραματικές εφαρμογές αναφέρεται απόρριψη της ατραζίνης έως και 97,8% με μεμβράνες RO, σε σύγκριση με σημαντικά χαμηλότερα ποσοστά (~84%) που επιτεύχθηκαν με μικρότερου μεγέθους πόρων μεμβράνες ή

άλλες διεργασίες διήθησης (Plakas & Karabelas, 2012). Η νανοδιήθηση (Nanofiltration - NF), αν και λειτουργεί σε χαμηλότερες πιέσεις σε σχέση με την αντίστροφη ώσμωση, εμφανίζει επίσης υψηλή αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση φυτοφαρμάκων, ιδίως ενώσεων με υψηλότερο μοριακό βάρος και φορτισμένες ομάδες. Ωστόσο, η απόδοση της NF μπορεί να παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση, καθώς επηρεάζεται από παράγοντες όπως το pH του νερού, το φορτίο της μεμβράνης και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε ρύπου (Plakas & Karabelas, 2012).

Επομένως, οι διεργασίες RO και NF προσφέρουν εξαιρετικά υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικών μικρορυπαντών, με ποσοστά που συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 90% και 99% για τα περισσότερα φυτοφάρμακα. Η ποιότητα του παραγόμενου νερού είναι ιδιαίτερα υψηλή, σε πολλές περιπτώσεις προσεγγίζοντας τα πρότυπα πόσιμου νερού, γεγονός που καθιστά τις τεχνολογίες αυτές κατάλληλες για εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης σε γεωργία και βιομηχανία. Επιπλέον, πρόκειται για ώριμες και ευρέως εφαρμοσμένες τεχνολογίες με εκτεταμένη τεχνική τεκμηρίωση και εμπορική διαθεσιμότητα. Παράλληλα, οι διεργασίες RO και NF χαρακτηρίζονται από αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις λόγω της ανάγκης εφαρμογής υψηλών πιέσεων, γεγονός που συνεπάγεται υψηλό λειτουργικό κόστος. Επιπλέον, απαιτείται κατάλληλη προεπεξεργασία με διήθηση της εισερχόμενης ροής ώστε να αποφεύγεται η φραγή των μεμβρανών (fouling), η οποία μπορεί να μειώσει σημαντικά την απόδοση και τη διάρκεια ζωής τους. Ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημα τόσο της αντίστροφης ώσμωσης (RO) όσο και της νανοδιήθησης (NF) είναι η παραγωγή συμπυκνωμένου ρεύματος απόρριψης (concentrate ή brine), το οποίο περιέχει αυξημένες συγκεντρώσεις των συκρατημένων ρύπων και απαιτεί κατάλληλη διαχείριση ή περαιτέρω επεξεργασία. Το ζήτημα αυτό είναι συνήθως εντονότερο στις διεργασίες RO λόγω της υψηλότερης ικανότητας συγκράτησης διαλυμένων ουσιών (Plakas & Karabelas, 2012).

Συνολικά, οι διεργασίες μεμβρανών RO και NF παρέχουν πολύ υψηλό επίπεδο απομάκρυνσης οργανικών ρυπαντών και αποτελούν αποτελεσματικά εργαλεία. Ωστόσο, το αυξημένο ενεργειακό και οικονομικό κόστος καθιστά συχνά αναγκαία την ενσωμάτωσή τους σε υβριδικά σχήματα επεξεργασίας, όπως ο συνδυασμός με MBR ή άλλες βιολογικές διεργασίες, ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη συνολική απόδοση και οικονομική βιωσιμότητα.

2.2.4.3 Προηγμένες Οξειδωτικές Διεργασίες (Advanced Oxidation Processes – AOPs)

Οι προηγμένες οξειδωτικές διεργασίες (Advanced Oxidation Processes – AOPs) αποτελούν μια κατηγορία σύγχρονων τεχνολογιών επεξεργασίας νερού και λυμάτων που βασίζονται στην *in situ* παραγωγή ιδιαίτερα δραστικών οξειδωτικών ειδών, κυρίως ριζών υδροξυλίου ($\cdot\text{OH}$) και θειικών ριζών ($\text{SO}_4^{\cdot-}$). Οι ρίζες αυτές χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλό οξειδωτικό δυναμικό και είναι ικανές να επιτίθενται μη εκλεκτικά σε ανθεκτικές οργανικές ενώσεις, οδηγώντας στη διάσπαση πολύπλοκων μοριακών δομών. Στις πιο διαδεδομένες AOPs περιλαμβάνονται η οζόνωση (O_3), ο συνδυασμός υπερϊώδους ακτινοβολίας με υπεροξείδιο του υδρογόνου ($\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$), οι αντιδράσεις τύπου Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$) και photo-Fenton, καθώς και διεργασίες ενεργοποίησης υπερθειικών αλάτων. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές στην αποδόμηση φυτοφαρμάκων με υψηλή χημική σταθερότητα, όπως η ατραζίνη, οργανοχλωριωμένα ή οργανοφωσφορικά εντομοκτόνα. Πρόσφατες ερευνητικές μελέτες καταδεικνύουν ότι η χρήση καταλυτών, όπως νανουλικά π.χ. nanoscale zero-valent iron - nZVI, ενισχύει σημαντικά την απόδοση των AOPs, αυξάνοντας τον ρυθμό παραγωγής ενεργών ριζών και επιταχύνοντας την αποδόμηση των ρύπων. Η προσέγγιση αυτή έχει οδηγήσει σε ποσοστά απομάκρυνσης που συχνά προσεγγίζουν το 100% για συγκεκριμένα φυτοφάρμακα, υπό βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας. Οι διεργασίες αυτές μπορούν να οδηγήσουν όχι μόνο σε μερική αποδόμηση, αλλά και σε πλήρη ανοργανοποίηση των ρύπων προς διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Επιπλέον, τα συστήματα AOPs απαιτούν σχετικά μικρό χώρο εγκατάστασης, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές με περιορισμένη διαθέσιμη έκταση. Όμως, παρά την υψηλή αποδοτικότητά τους, οι AOPs χαρακτηρίζονται από αυξημένες ενεργειακές και χημικές απαιτήσεις, καθώς συχνά απαιτούν έντονη UV ακτινοβολία, μεγάλες ποσότητες υπεροξειδίου του υδρογόνου ή άλλων οξειδωτικών παραγόντων (Aftab et al., 2025).

Συνολικά, οι προηγμένες οξειδωτικές διεργασίες προσφέρουν υψηλό ποσοτό απομάκρυνσης οργανικών ρύπων, υπό την προϋπόθεση ότι εφαρμόζονται σε κατάλληλες συνθήκες και συχνά ως μέρος υβριδικών συστημάτων επεξεργασίας. Ο συνδυασμός AOPs με βιολογικές ή διεργασίες μεμβρανών (π.χ. MBR–AOP ή RO–AOP) μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω τη συνολική απόδοση και να μειώσει το κόστος λειτουργίας.

2.2.4.4 Λύσεις Βασισμένες στη Φύση (Nature-based Solutions – NBS)

Οι λύσεις βασισμένες στη φύση (Nature-based Solutions – NBS) αποτελούν ένα ευρύ σύνολο πρακτικών διαχείρισης υδάτων και εδαφών που αξιοποιούν φυσικά οικοσυστήματα και οικολογικές διεργασίες για τη μείωση της ρύπανσης και την προστασία των υδατικών πόρων. Σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνολογικές λύσεις, οι NBS στοχεύουν στην πρόληψη και την ανάσχεση της ρύπανσης στην πηγή, λειτουργώντας συμπληρωματικά ή εναλλακτικά προς τα τεχνικά συστήματα επεξεργασίας (Prosser et al., 2020). Στις πλέον διαδεδομένες εφαρμογές των NBS περιλαμβάνονται οι φυτικές ζώνες ανάσχεσης (vegetated buffer strips) κατά μήκος καναλιών και υδατορευμάτων, οι αγροδοσοπονικές λωρίδες φύτευσης με θάμνους και δέντρα, καθώς και οι ζώνες προστασίας πεδίων υδροληψίας και ζώνες εκτόνωσης/συγκράτησης πλημμύρας. Οι ζώνες αυτές λειτουργούν ως φυσικά φίλτρα, επιβραδύνοντας την επιφανειακή απορροή και ευνοώντας την καθίζηση ιζημάτων και την κατακράτηση οργανικών ρύπων. Παράλληλα, η παρουσία βλάστησης και ενεργού εδαφικού μικροβιώματος δημιουργεί συνθήκες που επιτρέπουν τη μικροβιακή αποδόμηση και την προσρόφηση φυτοφαρμάκων και άλλων οργανικών μικρορυπαντών πριν αυτά καταλήξουν σε επιφανειακά ή υπόγεια ύδατα. Οι κατάλληλα σχεδιασμένες φυτεμένες ζώνες μπορούν να επιτύχουν σημαντική μείωση των φορτίων ρύπων. Σύμφωνα με τους Prosser et al. (2020), η αποτελεσματικότητά τους παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση και μπορεί να κυμαίνεται από 10% έως 100%, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ζώνης ανάσχεσης, τις συνθήκες απορροής και τις φυσικοχημικές ιδιότητες των φυτοπροστατευτικών. Η αποτελεσματικότητα των NBS σχετίζεται άμεσα με τη διάρκεια παραμονής του νερού εντός της ζώνης και την αυξημένη επαφή του με το έδαφος και τη ριζόσφαιρα των φυτών.

Συνολικά, οι NBSs χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα χαμηλό κόστος υλοποίησης και λειτουργίας, καθώς δεν απαιτούν πολύπλοκο μηχανολογικό εξοπλισμό ή υψηλή ενεργειακή κατανάλωση. Συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση της επιφανειακής απορροής και στη συγκράτηση ιζημάτων, ενώ ταυτόχρονα προσφέρουν πολλαπλά οικολογικά οφέλη, όπως βελτίωση της ποιότητας του εδάφους, δημιουργία οικοτόπων, ενίσχυση της βιοποικιλότητας και αναβάθμιση του φυσικού τοπίου. Επιπλέον, μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά με άλλες τεχνολογίες επεξεργασίας, ενισχύοντας τη συνολική αποτελεσματικότητα των συστημάτων διαχείρισης

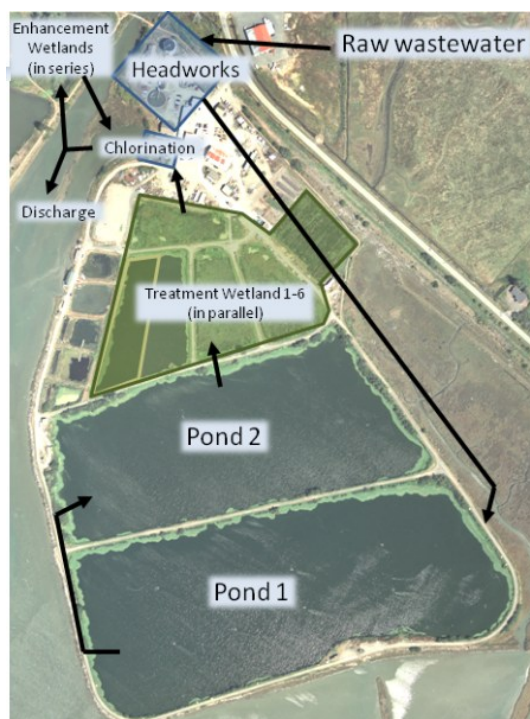
γεωργικών αποβλήτων. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι NBS απαιτούν διαθέσιμη γη και χρόνο για την πλήρη ανάπτυξη της φυτικής βλάστησης, ενώ προϋποθέτουν συνεχή παρακολούθηση και συντήρηση για τη διατήρηση της λειτουργικότητάς τους. Επιπροσθέτως η επίτευξη υψηλών επιπέδων απορρύπανσης δεν είναι άμεση, καθώς οι μηχανισμοί συγκράτησης, προσρόφησης, βιοαποδόμησης και φυτοαπορρύπανσης αναπτύσσονται σταδιακά και εξαρτώνται από τη μακροχρόνια εγκατάσταση και ωρίμανση του συστήματος. Η αποτελεσματικότητα των συστημάτων αυτών εμφανίζει σημαντική μεταβλητότητα, ανάλογα με παραμέτρους όπως το πλάτος της ζώνης, το είδος της βλάστησης, η κλίση του εδάφους και οι υδρολογικές συνθήκες. (Prosser et al., 2020).

2.2.4.5 Τεχνητοί Υγροβιότοποι (Constructed Wetlands)

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι (Constructed Wetlands – CWs) αποτελούν οικολογικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, τα οποία μιμούνται τις φυσικές διεργασίες καθαρισμού των φυσικών υγροτόπων και ανήκουν στην οικογένεια των NBSs. Στα συστήματα αυτά, το προς επεξεργασία νερό διοχετεύεται μέσω ζωνών φυτικής βλάστησης, υπεδάφους και πορώδων υλικών, όπως χαλίκια και άμμος, δημιουργώντας συνθήκες που ευνοούν τη φυσική απομάκρυνση ρύπων. Η λειτουργία τους βασίζεται σε συνδυασμό φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, όπως η καθίζηση αιωρούμενων στερεών, η προσρόφηση οργανικών ενώσεων στο υπόστρωμα και η μικροβιακή βιοαποδόμηση στη ριζόσφαιρα των φυτών. Η απομάκρυνση των οργανικών μικρορυπαντών αποδίδεται κυρίως στη δράση των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται στις ρίζες των φυτών και στα πορώδη υλικά του υποστρώματος, καθώς και στην προσρόφηση λιπόφιλων ενώσεων στα στερεά. Ιδιαίτερα τα υδρόφοβα φυτοφάρμακα παρουσιάζουν υψηλή τάση συγκράτησης στα υποστρώματα των υγροβιότοπων, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική μείωση των συγκεντρώσεών τους στο εξερχόμενο νερό. Σύμφωνα με μελέτες σε γεωργικά λύματα, ποσοστά απομάκρυνσης φυτοφαρμάκων άνω του 90% έχουν καταγραφεί σε κατάλληλα σχεδιασμένους υγροβιότοπους επιφανειακής ή υπεδάφιας ροής. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι λειτουργούν κατά κύριο λόγο παθητικά, απαιτώντας ελάχιστη έως μηδενική ενεργειακή κατανάλωση, γεγονός που τους καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικούς για αγροτικές περιοχές και αποκεντρωμένες εφαρμογές. Παρουσιάζουν χαμηλό λειτουργικό κόστος και προσφέρουν παράλληλα σημαντικά περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη, όπως αύξηση της βιοποικιλότητας,

δημιουργία οικοτόπων και δυνατότητες αναψυχής ή περιβαλλοντικής εκπαίδευσης. Επιπλέον, είναι ικανοί να αφαιρούν ταυτόχρονα θρεπτικά στοιχεία (άζωτο και φώσφορο) και παθογόνους μικροοργανισμούς. Ταυτόχρονα, οι τεχνητοί υγροβιότοποι απαιτούν σημαντική έκταση γης και μεγάλο χρόνο παραμονής του νερού, γεγονός που περιορίζει την εφαρμογή τους σε περιοχές με περιορισμένο διαθέσιμο χώρο. Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον σχεδιασμό του συστήματος, συμπεριλαμβανομένου του τύπου ροής, της επιλογής φυτικών ειδών και των χαρακτηριστικών του υποστρώματος. Εποχικοί παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και οι υδρολογικές συνθήκες, μπορούν να επηρεάσουν τη μικροβιακή δραστηριότητα και, κατ' επέκταση, την απόδοση απομάκρυνσης των ρύπων. Παρ' όλα αυτά, σε σωστά σχεδιασμένα και συντηρούμενα συστήματα, τα ποσοστά αφαίρεσης οργανικών μικρορυπαντών παραμένουν υψηλά, συχνά υπερβαίνοντας το 90% (Tang et al., 2021).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα συστήματος τεχνητών υγροβιοτόπων (constructed wetlands) μεγάλης κλίμακας αποτελεί το Arcata Marsh & Wildlife Sanctuary στην Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών (Εικόνα). Το σύστημα ενσωματώνει διαδοχικά στάδια επεξεργασίας, τα οποία περιλαμβάνουν λίμνες οξείδωσης, υγροβιότοπους επιφανειακής ροής και υγροβιότοπους ωρίμανσης, με στόχο τη σταδιακή μείωση του οργανικού φορτίου, των αιωρούμενων στερεών και των θρεπτικών στοιχείων των λυμάτων. Η επεξεργαστική του λειτουργία βασίζεται σε συνδυασμό φυσικοχημικών και βιολογικών διεργασιών, όπως η καθίζηση αιωρούμενων σωματιδίων, η ηλιακή απολύμανση μέσω υπεριώδους ακτινοβολίας, καθώς και η μικροβιακή αποδόμηση οργανικής ύλης υπό αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες. Επιπλέον, η ανάπτυξη υδρόβιας βλάστησης και βιοφίλμ μικροοργανισμών συμβάλλει σημαντικά στην απομάκρυνση θρεπτικών στοιχείων, όπως το άζωτο και ο φώσφορος.



Εικόνα 2 Αεροφωτογραφία του συστήματος τεχνητών υδροβιοτόπων Arcata Marsh & wildlife Sanctuary, με απεικόνιση των επιμέρους σταδίων επεξεργασίας των λυμάτων. Πηγή: Friends of Arcata Marsh. (n.d.) Sustainable water treatment: A conventional and a natural treatment system. <https://www.arcatamarshfriends.org/wp-content/uploads/wastewater-brochure.pdf>

Πίνακας 1 Συγκριτική αξιολόγηση προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας

Τεχνολογία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Απόδοση
MBR	Εκροή πολύ υψηλής ποιότητας (χαμηλό COD, TSS, παθογόνα).	Υψηλό κόστος ενέργειας.	Μέτρια
	Βιοαπόδοση και μεμβρανική διήθηση.	Ευαίσθητο σε φραγή μεμβρανών. Δεν αφαιρεί πλήρως τους οργανικούς ρύπους.	
RO/NF	Αφαίρεση σχεδόν όλους τους οργανικούς	Υψηλό κόστος ενέργειας.	Πολύ υψηλή

	μικρορύπους)(>90–99%).	Υψηλό λειτουργικό κόστος.	
		Απαιτεί διαχείριση συμπυκνωμάτων.	
AOPs	Πλήρης αποδόμηση σταθερών οργανικών.	Κόστος ενέργειας/χημικών.	
	Συμπαγείς αντιδραστήρες.	Δευτερογενή παραπροϊόντα.	Υψηλή
		Απαιτεί ακριβή έλεγχο.	
NBS	Φιλτράρισμα με φυσικές διεργασίες (διήθηση, προσρόφηση).	Απαιτείται χώρος, συντήρηση.	
		Απόδοση εξαρτάται από παράγοντες όπως έκταση και έδαφος.	Μεταβλητή
	Οικονομικές λύσεις.		
CWs	Παθητική λειτουργία.		
	Οικολογικά οφέλη (βιοποικιλότητα, αναψυχή).	Μεγάλος χώρος και χρόνος παραμονής.	
	Πολυβάθμια μείωση ρύπων (>90%).	Απόδοση εξαρτάται από σχεδιασμό/εποχή.	Υψηλή

Η συγκριτική παρουσίαση των πλεονεκτημάτων, των μειονεκτημάτων και της απόδοσης των διεργασιών στον Πίνακα 1, αναδεικνύει τη σημασία της συνδυαστικής ή διαδοχικής εφαρμογής των προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη μέγιστη αξιοποίηση των ισχυρών τους σημείων και την αποτελεσματική αντιμετώπιση των επιμέρους περιορισμών τους. Τα υβριδικά σχήματα επεξεργασίας επιτρέπουν την επίτευξη υψηλότερων ποσοστών απομάκρυνσης ρύπων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου τα απόβλητα περιέχουν ανθεκτικούς οργανικούς μικρορυπαντές (Lopes et al., 2020; Nguyen et al., 2022). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο συνδυασμός MBR με RO ή AOPs. Στα σχήματα αυτά, το MBR λειτουργεί ως πρωτοβάθμιο και δευτεροβάθμιο στάδιο επεξεργασίας, μειώνοντας το οργανικό φορτίο, τα αιωρούμενα στερεά και τους παθογόνους μικροοργανισμούς, ενώ τα επόμενα στάδια (RO ή AOPs) εξασφαλίζουν την απομάκρυνση ή την πλήρη αποδόμηση των υπολειπόμενων ανθεκτικών

οργανικών ενώσεων. Μελέτες δείχνουν ότι τέτοιοι συνδυασμοί μπορούν να οδηγήσουν σε σχεδόν πλήρη καθαρισμό του νερού, με ποσοστά απομάκρυνσης που υπερβαίνουν το 90–95% για τα περισσότερα φυτοφάρμακα (Lopes et al., 2020; Plakas & Karabelas, 2012). Παράλληλα, υβριδικά σχήματα που συνδυάζουν τεχνικές επεξεργασίας με οικολογικές λύσεις, όπως τεχνητούς υγροβιότοπους ή φυτοζώνες, μετά από ένα αρχικό στάδιο βιολογικής επεξεργασίας, αξιοποιούν τις συνέργειες μεταξύ βιοαποδόμησης και φυσικής διήθησης. Στα συστήματα αυτά, οι υγροβιότοποι ή οι φυτευμένες ζώνες λειτουργούν ως τελικό στάδιο μειώνοντας περαιτέρω τα φορτία (Prosser et al., 2020; Tang et al., 2021).

2.3 Κίνδυνοι και οφέλη της επαναχρησιμοποίησης αποβλήτων στη γεωργία

Η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αστικών υγρών αποβλήτων στη γεωργία συνοδεύεται από ένα σύνολο δυνητικών οφελών αλλά και κινδύνων (Εικόνα 2), οι οποίοι πρέπει να αξιολογούνται συστηματικά στο πλαίσιο της βιώσιμης διαχείρισης υδατικών πόρων. Η ολιστική προσέγγιση που υιοθετείται διεθνώς βασίζεται στην ανάλυση κόστους–οφέλους και στη διαχείριση κινδύνου, με στόχο τη μεγιστοποίηση των θετικών επιπτώσεων και τον περιορισμό των αρνητικών (Asano et al., 2007).



Εικόνα 3 Κίνδυνοι της επαναχρησιμοποίησης υγρών αποβλήτων στη γεωργία

2.3.1 Υγειονομικοί κίνδυνοι

Οι υγειονομικοί κίνδυνοι αποτελούν τη σημαντικότερη πρόκληση της επαναχρησιμοποίησης αστικών λυμάτων στην γεωργία και σχετίζονται κυρίως με την παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, ιοί, πρωτόζωα και αυγά ελμίνθων. Η έκθεση μπορεί να αφορά τους αγρότες, τους καταναλωτές αγροτικών προϊόντων και τις τοπικές κοινότητες μέσω άμεσης επαφής, κατανάλωσης ή εισπνοής αερολυμάτων (WHO, 2006). Ο κίνδυνος διαφοροποιείται ανάλογα με το επίπεδο επεξεργασίας των λυμάτων, τον τύπο της καλλιέργειας και τη μέθοδο άρδευσης. Η σύγχρονη επιστημονική προσέγγιση βασίζεται στη μεθοδολογία της ποσοτικής αξιολόγησης μικροβιολογικού κινδύνου (Quantitative Microbial Risk Assessment – QMRA), η οποία επιτρέπει τον καθορισμό αποδεκτών επιπέδων κινδύνου και την επιλογή κατάλληλων μέτρων μείωσης (Haas et al., 2014). Μέτρα όπως η στάγδην άρδευση, η χρονική απόσταση μεταξύ άρδευσης και συγκομιδής, καθώς και η εκπαίδευση των εργαζομένων συμβάλλουν σημαντικά στον περιορισμό των υγειονομικών κινδύνων.

2.3.2 Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι

Οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι σχετίζονται κυρίως με τη μακροχρόνια επίδραση της χρήσης επεξεργασμένων λυμάτων στο έδαφος, τα υπόγεια νερά και τα οικοσυστήματα. Η συσσώρευση αλάτων, βαρέων μετάλλων και οργανικών μικρορύπων μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους και σε μείωση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών (Pedrero et al., 2010). Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλεί η παρουσία αναδυόμενων ρύπων, όπως φαρμακευτικές ουσίες, προϊόντα προσωπικής φροντίδας και ενδοκρινικοί διαταράκτες, οι οποίοι δεν απομακρύνονται πλήρως με τις συμβατικές τεχνολογίες επεξεργασίας. Αν και οι συγκεντρώσεις τους είναι συνήθως χαμηλές, η μακροχρόνια έκθεση και η πιθανή βιοσυσσώρευση αποτελούν αντικείμενο εντατικής έρευνας (Luo et al., 2014).

2.3.3 Οικονομικοί και κοινωνικοί κίνδυνοι

Πέραν των τεχνικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων, η επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων επηρεάζεται από οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες. Το κόστος επενδύσεων σε υποδομές επεξεργασίας και μεταφοράς μπορεί να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα,

ιδιαίτερα σε μικρές αγροτικές κοινότητες. Παράλληλα, η κοινωνική αποδοχή της χρήσης επεξεργασμένου νερού παραμένει πρόκληση, καθώς συχνά συνδέεται με αντιλήψεις κινδύνου και έλλειψη εμπιστοσύνης στους θεσμούς και την επιστήμη (Po et al., 2003).

2.3.4 Οφέλη για τη γεωργία και το περιβάλλον

Παρά τους κινδύνους, τα οφέλη της επαναχρησιμοποίησης αστικών λυμάτων στη γεωργία είναι πολλαπλά και τεκμηριωμένα. Το σημαντικότερο όφελος είναι η εξοικονόμηση γλυκού νερού και η μείωση της πίεσης στους φυσικούς υδατικούς πόρους, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη λειψυδρία (FAO, 2020). Επιπλέον, τα επεξεργασμένα λύματα περιέχουν θρεπτικά στοιχεία, τα οποία μπορούν να μειώσουν την ανάγκη για χημικά λιπάσματα και να συμβάλουν στη βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους. Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, η επαναχρησιμοποίηση συμβάλλει στη μείωση της απόρριψης λυμάτων σε υδατικούς αποδέκτες, περιορίζοντας φαινόμενα ευτροφισμού και υποβάθμισης οικοσυστημάτων. Παράλληλα, ενισχύει την εφαρμογή αρχών κυκλικής οικονομίας, προωθώντας την ανάκτηση πόρων από τα απόβλητα (Angelakis & Gikas, 2014).

Κεφάλαιο 3. Θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελλάδα

3.1 Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την επαναχρησιμοποίηση υδάτων και συγκριτική ανάλυση διεθνών προδιαγραφών

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το βασικό κανονιστικό πλαίσιο για την επαναχρησιμοποίηση νερού καθορίζεται από τον Κανονισμό (ΕΕ) 2020/741, ο οποίος θεσπίζει ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας και υποχρεώσεις διαχείρισης κινδύνου για τη χρήση ανακτημένου νερού στη γεωργική άρδευση (Council of the European Communities, 1991). Ο κανονισμός αποσκοπεί στη διασφάλιση της ασφαλούς χρήσης του ανακτημένου νερού, στην ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας και στη μείωση των πιέσεων στους φυσικούς υδατικούς πόρους.

Βασική καινοτομία του Κανονισμού αποτελεί η εισαγωγή τεσσάρων κατηγοριών ποιότητας ανακτημένου νερού (Α, Β, Γ και Δ), οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα επεξεργασίας και επιτρεπόμενες χρήσεις ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας και τον βαθμό υγειονομικού κινδύνου (Πίνακας 2). Παράλληλα, θεσπίζεται η υποχρέωση εφαρμογής Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνου για την Επαναχρησιμοποίηση Νερού (Water Reuse Risk Management Plan), το οποίο καλύπτει όλα τα στάδια από την επεξεργασία έως την τελική χρήση του νερού.

Οι ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας του ανακτημένου νερού περιλαμβάνουν μικροβιολογικές και φυσικοχημικές παραμέτρους, όπως το βακτήριο *Escherichia coli*, το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand, BOD₅), τα ολικά αιωρούμενα στερεά (Total Suspended Solids, TSS) και η θολότητα. Για χρήσεις υψηλού υγειονομικού κινδύνου προβλέπονται επιπλέον απαιτήσεις σχετικά με τη *Legionella spp.* και τα εντερικά νηματοδή. Οι απαιτήσεις αυτές διαμορφώνονται σύμφωνα με την αρχή της αναλογικότητας, ώστε υψηλότερος κίνδυνος έκθεσης να συνεπάγεται αυστηρότερες προδιαγραφές ποιότητας.

Πέραν των μικροβιολογικών παραμέτρων, ιδιαίτερη σημασία για τη γεωργική χρήση του ανακτημένου νερού έχουν και οι φυσικοχημικοί δείκτες, όπως το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (Electrical Conductivity, EC), τα ολικά διαλυμένα στερεά (Total Dissolved Solids, TDS), τα θρεπτικά στοιχεία και η συγκέντρωση δυνητικά τοξικών ιχνοστοιχείων. Οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν άμεσα τη γονιμότητα του εδάφους, την παραγωγικότητα των καλλιεργειών και τη μακροχρόνια βιωσιμότητα των γεωργικών συστημάτων (Tchobanoglous et al., 2014).

Παράλληλα, για την αξιολόγηση της καταλληλότητας του νερού άρδευσης χρησιμοποιούνται φυσικοχημικές παράμετροι όπως η αλατότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, τα ολικά διαλυμένα στερεά και ο δείκτης προσρόφησης νατρίου (Sodium Adsorption Ratio - SAR), οι οποίες

επηρεάζουν τη δομή και τη γονιμότητα του εδάφους σύμφωνα με τις οδηγίες του Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO) (Ayers & Westcot, 1985).

Σε διεθνές επίπεδο, έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές προσεγγίσεις για τη διαχείριση της επαναχρησιμοποίησης νερού. Οι κατευθυντήριες οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (World Health Organization - WHO) βασίζονται κυρίως στην προσέγγιση διαχείρισης κινδύνου (risk-based approach), δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στη μείωση της έκθεσης παρά στην αποκλειστική συμμόρφωση με συγκεκριμένα αριθμητικά όρια. Αντίστοιχα, οι οδηγίες της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (United States Environmental Protection Agency - EPA) συνδυάζουν ποιοτικές απαιτήσεις με συγκεκριμένες τεχνολογικές προδιαγραφές, ενώ οι οδηγίες του FAO επικεντρώνονται κυρίως στις γεωργικές και εδαφικές επιπτώσεις της χρήσης ανακτημένου νερού. Συγκριτικά, ο Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 αποτελεί ένα από τα πλέον ολοκληρωμένα κανονιστικά πλαίσια διεθνώς, καθώς συνδυάζει αυστηρά ποιοτικά κριτήρια με υποχρεωτική διαχείριση κινδύνου και σαφείς διαδικασίες παρακολούθησης.

Η συγκριτική αξιολόγηση των διεθνών προσεγγίσεων δείχνει ότι η αποτελεσματική εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης νερού απαιτεί συνδυασμό κανονιστικής σαφήνειας, τεχνικής επάρκειας και συνεχούς παρακολούθησης. Παράλληλα, προϋποθέτει συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων και προσαρμογή στις ιδιαίτερες περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές συνθήκες κάθε περιοχής.

Πίνακας 2 Κατηγορίες ποιότητας ανακτημένου νερού για γεωργική επαναχρησιμοποίηση σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΕ) 2020/741 Πηγή: Προσαρμογή από το ΦΕΚ Β΄ 354/08.03.2011 περί επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων.

Ελάχιστη κατηγορία ποιότητας του ανακτημένου νερού	Κατηγορία καλλιέργειας ¹	Μέθοδος άρδευσης
A	Όλες οι καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που καταναλώνονται ωμά των οποίων το βρώσιμο τμήμα έρχεται σε άμεση επαφή με ανακτημένο νερό και τα ριζώδη φυτά που καταναλώνονται ωμά	Όλες οι μέθοδοι άρδευσης

B	Καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που καταναλώνονται ωμά όταν το βρώσιμο μέρος παράγεται πάνω από το έδαφος και δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με ανακτημένο νερό, καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που μεταποιούνται και καλλιέργειες μη εδώδιμων φυτών, συμπεριλαμβανομένων των καλλιεργειών που χρησιμοποιούνται για τη διατροφή γαλακτοπαραγωγικών ζώων ή ζώων που παράγουν κρέας	Όλες οι μέθοδοι άρδευσης
Γ	Καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που καταναλώνονται ωμά όταν το βρώσιμο μέρος παράγεται πάνω από το έδαφος και δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με ανακτημένο νερό, καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που μεταποιούνται και καλλιέργειες μη εδώδιμων φυτών, συμπεριλαμβανομένων των καλλιεργειών που χρησιμοποιούνται για τη διατροφή γαλακτοπαραγωγικών ζώων ή ζώων που παράγουν κρέας	Στάγδην άρδευση ² ή άλλη μέθοδος άρδευσης που αποφεύγει την άμεση επαφή με το βρώσιμο μέρος της καλλιέργειας
Δ	Βιομηχανικές και ενεργειακές καλλιέργειες και καλλιέργειες σπόρων	Όλες οι μέθοδοι άρδευσης ³

¹Εάν ο ίδιος τύπος αρδευόμενης καλλιέργειας εμπίπτει σε πολλαπλές κατηγορίες του πίνακα, ισχύουν οι απαιτήσεις της αυστηρότερης κατηγορίας.

²Στάγδην άρδευση είναι ένα σύστημα μικροάρδευσης φυτών με σταγόνες ή μικρά ρυάκια νερού και συνίσταται στην παροχή νερού σε σταγόνες πάνω στο έδαφος ή απευθείας κάτω από την επιφάνεια του σε πολύ χαμηλές ροές (2–20 λίτρα/ώρα) μέσω ενός συστήματος πλαστικών σωλήνων μικρής διαμέτρου στο οποίο προσαρμίζονται εκροές που ονομάζονται σταλάκτες.

³Στις περιπτώσεις μεθόδου άρδευσης τεχνητής βροχής, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην προστασία της υγείας των εργαζομένων ή των παρευρισκόμενων. Για τον σκοπό αυτό, εφαρμόζονται κατάλληλα προληπτικά μέτρα.

Στο πλαίσιο των κατευθυντήριων γραμμών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, οι ποιοτικές απαιτήσεις δεν περιορίζονται μόνο σε μικροβιολογικές και βασικές φυσικοχημικές παραμέτρους, αλλά επεκτείνονται και στον έλεγχο της περιεκτικότητας σε συγκεκριμένα χημικά στοιχεία με πιθανή φυτοτοξική ή οικοτοξική δράση. Ειδικότερα, ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τις μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις επιλεγμένων στοιχείων, όπως βαρέα μέταλλα και ιχνοστοιχεία, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την καταλληλότητα του ανακτημένου νερού για γεωργική χρήση. Τα όρια αυτά διαφοροποιούνται ανά στοιχείο, λαμβάνοντας υπόψη τη

συμπεριφορά τους στο έδαφος, την κινητικότητα τους και τη δυνατότητα βιοσυσσώρευσης, καθώς και τις πιθανές τοξικές επιδράσεις σε φυτά, ζώα και τον άνθρωπο μέσω της τροφικής αλυσίδας.

Πίνακας 3 Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις των χημικών στοιχείων των ανακτημένων υγρών αποβλήτων που προορίζονται για επαναχρησιμοποίηση (παράρτημα II / Κ.Υ.Α. 145116/2011).

Χημ. Στοιχείο	Μέγιστη συγκέντρωση (mg/L)	Παρατηρήσεις
Al (Αργίλιο)	5,0	Σε όξινα εδάφη ($\text{pH} < 5,5$) ενδέχεται να καταστεί μη παραγωγικό, ενώ σε βασικά εδάφη ($\text{pH} > 7,0$) κατακρατούνται τα αλουμίνια περισσότερο στο έδαφος.
As (Αρσενικό)	0,10	Τοξική επίδραση στα φυτά ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας. Όριο 12 mg/L για το γρασίδι, μέχρι 0,05 mg/L για το λάχανο.
Be (Βηρύλλιο)	0,10	Τοξική επίδραση στα φυτά ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας· όριο 5 mg/L για το λάχανο μέχρι 0,5 mg/L για τα φασόλια.
Cd (Κάδμιο)	0,01	Τοξικό για τα φυτά σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις (0,1 mg/L). Προτείνεται χαμηλό όριο λόγω συσσώρευσης του στο φυτικό ιστό, επικίνδυνη για τον άνθρωπο.
Co (Κοβάλτιο)	0,05	Τοξικό για την καλλιέργεια πατάτας σε συγκεντρώσεις $> 0,1$ mg/L. Έχει την τάση να αδρανοποιείται σε ουδέτερα και αλκαλικά εδάφη.
Cr (Χρώμιο)	0,10	Το χρώμιο προτείνεται να είναι σε εξασθενή δισθενή μορφή (Cr^{3+}).
Cu (Χαλκός)	0,20	Τοξικό για ορισμένες καλλιέργειες σε συγκεντρώσεις $> 0,1-1,0$ mg/L.

F (Φθόριο)	1,0	Αρνητικό για ευαισθητα καλλιεργούμενα είδη.
Fe (Σίδηρος)	3,0	Μη τοξικό για τα φυτά σε όξινα εδάφη, αλλά μπορεί να δημιουργήσει τοξικότητα σε εδάφη χαμηλού pH.
Li (Λίθιο)	2,5	Παρουσιάζει αυξημένη κινητικότητα στο έδαφος. Είναι τοξικό σε συγκεντρώσεις > 0,075 mg/L. Έχει δράση παρόμοια με το βόριο.
Mn (Μαγγάνιο)	0,20	Τοξικό για ορισμένες καλλιέργειες μέχρι και μικρά ποσά σε όξινα εδάφη.
Mo (Μολυβδαίνιο)	0,01	Μη τοξικό αλλά σε αυξημένες συγκεντρώσεις μπορεί να γίνει τοξικό για τα ζώα αν απορροφηθεί από φυτά.
Ni (Νικέλιο)	0,20	Τοξικό για ορισμένες καλλιέργειες σε συγκεντρώσεις > 0,5 mg/L έως 1,0 mg/L. Η κινητικότητά του αυξάνει σε αλκαλικά εδάφη.
Pb (Μόλυβδος)	5,0	Σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να συσσωρευτεί στην επιφάνεια των φυτών.
Se (Σελήνιο)	0,02	Τοξικό για τα φυτά ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις (0,025 mg/L), είναι τοξικό για τα ζώα αν απορροφηθεί από τις καλλιέργειες.
Sn (Κασσίτερος)	—	Συνήθως βρίσκεται σε εδάφη με χαμηλή διαθεσιμότητα για τα φυτά.
Ti (Τιτάνιο)	—	Δεν θεωρείται φυτοτοξικό στις συνήθεις συγκεντρώσεις.
V (Βανάδιο)	0,10	Τοξικό σε πολλά φυτά σε χαμηλές συγκεντρώσεις.

Zn (Ψευδάργυρος)	2,0	Παρουσιάζει αυξημένη τοξικότητα σε εδάφη με pH < 6,0 και αλκαλικά ή οργανικά εδάφη. Τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις, απαραίτητο ιχνοστοιχείο σε μικρές ποσότητες.
------------------	-----	---

3.1.2 Απαιτήσεις παρακολούθησης

Η νομοθεσία δεν περιορίζεται στον καθορισμό ορίων ποιότητας, αλλά επιβάλλει και σαφείς απαιτήσεις παρακολούθησης. Ο φορέας λειτουργίας της εγκατάστασης ανάκτησης υποχρεούται να πραγματοποιεί συνήθη παρακολούθηση, ώστε να επαληθεύει ότι το ανακτημένο νερό συμμορφώνεται με τις ελάχιστες απαιτήσεις για τη σχετική κατηγορία ποιότητας (Council of the European Communities, 1991). Οι υποχρεώσεις αυτές εξειδικεύονται μέσα από τις ελάχιστες συχνότητες συνήθους παρακολούθησης, οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με την κατηγορία ποιότητας του ανακτημένου νερού και την παράμετρο που ελέγχεται, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4 Ελάχιστες συχνότητες συνήθους παρακολούθησης

Σημείωση. Προσαρμογή από τον Κανονισμό (ΕΕ) 2020/741 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, Παράρτημα Ι (Ευρωπαϊκή Ένωση, 2020).

Κατηγορία ποιότητας	E. coli	BOD5	TSS	Θολότητα	Legionella spp.	Εντερικά νηματούδη
A	Μια φορά την εβδομάδα	Μια φορά την εβδομάδα	Μια φορά την εβδομάδα	Συνεχής	Δύο φορές τον μήνα (κατά περίπτωση)	Δύο φορές τον μήνα ή όπως καθορίζεται από τον φορέα λειτουργίας
B	Μια φορά την εβδομάδα	Σύμφωνα με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ	Σύμφωνα με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ	-	-	-

Κατηγορία ποιότητας	E. coli	BOD5	TSS	Θολότητα	Legionella spp.	Εντερικά νηματούδη
Γ	Δύο φορές τον μήνα	-	-	-	-	-
Δ	Δύο φορές τον μήνα	-	-	-	-	-

Επιπλέον, ο κανονισμός προβλέπει και παρακολούθηση για επικύρωση, κυρίως για νέες εγκαταστάσεις ανάκτησης ή σε περίπτωση σημαντικής αναβάθμισης του εξοπλισμού ή των διεργασιών. Η επικύρωση αφορά την ικανότητα της αλυσίδας επεξεργασίας να επιτυγχάνει τη ζητούμενη μείωση παθογόνων μικροοργανισμών, εκφρασμένη ως μείωση log10. Οι στόχοι της παρακολούθησης επικύρωσης αποτυπώνονται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις μείωσης μικροοργανισμών-δεικτών, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να τεκμηριωθεί η αποτελεσματικότητα της αλυσίδας επεξεργασίας, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5 (Council of the European Communities, 1991).

Πίνακας 5 Στόχοι επίδοσης για παρακολούθηση επικύρωσης (Κατηγορία Α)

Σημείωση. Προσαρμογή από τον Κανονισμό (ΕΕ) 2020/741 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, Παράρτημα Ι (Council of the European Communities, 1991).

Μικροοργανισμός-δείκτης	Στόχος μείωσης log10
<i>E. coli</i>	≥ 5,0
Σύνολο κολιφάγων / ειδικοί F κολιφάγοι / σωματικοί κολιφάγοι / κολιφάγοι	≥ 6,0
Σπόρια <i>Clostridium perfringens</i>	≥ 4,0

Μικροοργανισμός-δείκτης	Στόχος μείωσης log10
Σποριογόνα, θεικά-αναγωγικά βακτηρίδια	≥ 5,0

3.1.3 Προληπτικά μέτρα και «φραγμοί»

Ο κανονισμός υιοθετεί την προσέγγιση των πολλαπλών φραγμών, σύμφωνα με την οποία η ασφάλεια του συστήματος δεν βασίζεται αποκλειστικά στην ποιότητα του νερού στο σημείο εξόδου της εγκατάστασης, αλλά και σε συμπληρωματικά τεχνικά, οργανωτικά και λειτουργικά μέτρα. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν ελεγχόμενη πρόσβαση, ειδικές μεθόδους άρδευσης, ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας, πρόσθετα μέτρα απολύμανσης, περιορισμούς πριν από τη συγκομιδή, καθώς και ειδική σήμανση όπου χρησιμοποιείται ανακτημένο νερό (Council of the European Communities, 1991). Η λογική των πολλαπλών φραγμών εξειδικεύεται μέσα από συγκεκριμένα προληπτικά μέτρα, τα οποία διαφοροποιούνται ανάλογα με την κατηγορία ποιότητας του ανακτημένου νερού και τον πιθανό τρόπο έκθεσης, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6 Ενδεικτικά ειδικά προληπτικά μέτρα

Σημείωση. Προσαρμογή από τον Κανονισμό (ΕΕ) 2020/741 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, Παράρτημα II (Council of the European Communities, 1991).

Κατηγορία ποιότητας	Ειδικά προληπτικά μέτρα
A	Αποφυγή έκθεσης χοίρων σε χορτονομές αρδευμένες με ανακτημένο νερό χωρίς επαρκή τεκμηρίωση ασφαλείας
B	Απαγόρευση συγκομιδής προϊόντων που είναι υγρά από άρδευση ή έχουν πέσει στο έδαφος

Κατηγορία ποιότητας	Ειδικά προληπτικά μέτρα
Β	Αποκλεισμός αγελάδων γαλακτοπαραγωγής από βοσκότοπους μέχρι να στεγνώσουν
Γ	Αποκλεισμός ζώων βοσκής από βοσκότοπο για πέντε ημέρες μετά την τελευταία άρδευση
Δ	Απαγόρευση συγκομιδής προϊόντων υγρών από άρδευση ή πεσμένων στο έδαφος

Η ύπαρξη αυτών των προληπτικών μέτρων δείχνει ότι η ευρωπαϊκή νομοθεσία δεν αντιμετωπίζει την ασφάλεια της επαναχρησιμοποίησης μόνο ως θέμα τεχνολογίας επεξεργασίας, αλλά ως συνδυασμό τεχνικής ποιότητας, σωστής διαχείρισης και ορθής χρήσης στο πεδίο.

Συμπεράσματα

Ο Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 αποτελεί ένα κομβικό βήμα στη διαμόρφωση μιας κοινής ευρωπαϊκής πολιτικής για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υδάτων στη γεωργική άρδευση. Η σημασία του έγκειται στο ότι συνδυάζει την προστασία της υγείας και του περιβάλλοντος με την ανάγκη για εξοικονόμηση νερού, ανθεκτικότητα στην κλιματική αλλαγή και προώθηση της κυκλικής οικονομίας (Council of the European Communities, 1991).

Η ευρωπαϊκή νομοθεσία διαμορφώνει έναν ολοκληρωμένο μηχανισμό ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης, ο οποίος μπορεί να υποστηρίξει τη βιώσιμη γεωργική ανάπτυξη, ιδίως σε περιοχές με περιορισμένους υδατικούς πόρους.

3.2 Γενική εικόνα των υδατικών πόρων στην Ελλάδα

Η Ελλάδα κατατάσσεται στις χώρες της Μεσογείου με έντονα προβλήματα υδατικής διαθεσιμότητας, τα οποία οφείλονται τόσο σε φυσικούς όσο και σε ανθρωπογενείς παράγοντες. Η

άνιση χωρική και χρονική κατανομή των βροχοπτώσεων, η υψηλή εποχικότητα της ζήτησης νερού (κυρίως λόγω τουρισμού και άρδευσης) και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής δημιουργούν συνθήκες αυξημένης υδατικής πίεσης. Ιδιαίτερα οι νησιωτικές και νότιες περιοχές της χώρας αντιμετωπίζουν συχνά φαινόμενα λειψυδρίας, τα οποία αναμένεται να ενταθούν στο μέλλον (ΕΕΑ, 2019). Η γεωργία αποτελεί τον κυριότερο καταναλωτή υδατικών πόρων στην Ελλάδα, απορροφώντας ποσοστό άνω του 80% των συνολικών απολήψεων νερού. Η εκτεταμένη χρήση υπόγειων υδροφορέων για άρδευση έχει οδηγήσει σε φαινόμενα υπεράντλησης, υφαλμύρινσης και ποιοτικής υποβάθμισης των υδάτων, ιδίως σε παράκτιες περιοχές. Στο πλαίσιο αυτό, η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων αναδεικνύεται ως στρατηγική επιλογή για τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων της χώρας. (Angelakis & Gikas, 2014).

3.3 Νομοθετικό πλαίσιο και ρυθμίσεις της επεξεργασίας λυμάτων στην Ελλάδα

Η κατασκευή υποδομών αποχέτευσης και επεξεργασίας λυμάτων στην Ελλάδα ξεκίνησε τη δεκαετία του 1980 και επιταχύνθηκε τη δεκαετία του 1990 με την ενσωμάτωση της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ (ΚΥΑ 5673/400/1997) και τη χρηματοδοτική στήριξη της Ε.Ε.. Η εξέλιξη αυτή οδήγησε σε σημαντική πρόοδο στη διαχείριση αστικών λυμάτων και συνέβαλε στη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων.

Σήμερα, η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων ρυθμίζεται κυρίως από την Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ) οικ. 145116/2011 (ΦΕΚ 354/Β/2011), όπως τροποποιήθηκε με την ΥΑ οικ. 191002/2013 (ΦΕΚ 2220/Β/2013). Αν και το πλαίσιο αυτό θεωρείται προοδευτικό για την εποχή του, παρουσιάζει δυσκολίες εφαρμογής και περιορισμένη εναρμόνιση με τον νεότερο ευρωπαϊκό κανονισμό (Tsagarakis et al., 2004). Με βάση αυτά τα άρθρα, καθορίζονται οι όροι και οι διαδικασίες για την ασφαλή και περιβαλλοντικά αποδεκτή επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων, με στόχο την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος. Τα επεξεργασμένα απόβλητα πρέπει να είναι συγκεκριμένης ποιότητας προτού να χρησιμοποιηθούν. Ως προς τις κατηγορίες χρήσης διακρίνονται δύο βασικοί τύποι άρδευσης, η περιορισμένη και η απεριόριστη. Η περιορισμένη άρδευση, περιλαμβάνει προϊόντα τα οποία δεν καταναλώνονται άμεσα αλλά μετά από επεξεργασία, καθώς και καλλιέργειες που δεν έρχονται

σε επαφή με το έδαφος. Σε αυτήν την κατηγορία η άρδευση με καταιονισμό, απαγορεύεται. Αντίθετα η απεριόριστη άρδευση περιλαμβάνει όλους τους τύπους καλλιεργειών και επιτρέπει την άρδευση με καταιονισμό. Σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνονται και προϊόντα, που προορίζονται για άμεση κατανάλωση, ωστόσο, τα λύματα έχουν επεξεργαστεί και απολυμανθεί σε μεγαλύτερο βαθμό, συγκριτικά με την περιορισμένη. Όσον αφορά τα βιοστερεά, για να χρησιμοποιηθούν στη γεωργία, πρέπει αποκλειστικά να είναι οικιακής ή αστικής προέλευσης (ΚΥΑ 80568/4225/22-03-1991). Επίσης έλεγχος πρέπει να γίνεται στην περιεκτικότητά τους σε βαρέα μέταλλα, βάση των ανώτατων ορίων που έχουν θεσπιστεί (Οδηγία 86/278/EEC). Τέλος δεν πρέπει να εφαρμόζονται σε εδάφη με κλίση $>8\%$, σε εδάφη σε αστικές περιοχές αλλά και σε προστατευόμενες περιοχές.

Γενικότερα, η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων βασίζεται σε τρεις κανόνες:

1. Την αποτελεσματική επεξεργασία, ώστε η ανακτημένη εκροή να πληροί όλα τα κριτήρια ποιότητας που έχουν τεθεί για την ασφαλή και περιβαλλοντικά αποδεκτή εφαρμογή της.
2. Την διασφάλιση της προστασίας της δημόσιας υγείας.
3. Την χρήση των βιοστερεών με τρόπο που προάγει την αποδοχή από την κοινωνία, μέσω της ενημέρωσης του κοινού, για τα οφέλη και τους πιθανούς κινδύνους που ενέχει η χρήση τους, ενισχύοντας έτσι την εμπιστοσύνη.

Η ελληνική νομοθεσία για την επαναχρησιμοποίηση έχει διαμορφωθεί σταδιακά, άρρητα συνδεδεμένη με το ευρωπαϊκό δίκαιο για την προστασία των υδάτων, την επεξεργασία αστικών λυμάτων και τη διαχείριση των υπόγειων και επιφανειακών υδατικών συστημάτων (Ν. 3199/2003· Π.Δ. 51/2007). Το πλαίσιο αυτό δεν περιορίζεται μόνο στη διάθεση των επεξεργασμένων εκροών, αλλά οργανώνει τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησής τους με βάση ποιοτικά κριτήρια, τεχνικές απαιτήσεις και διοικητικές διαδικασίες αδειοδότησης (Council of the European Communities, 1991).

Κεντρικό σημείο αναφοράς του θεσμικού πλαισίου της Ελλάδας υπήρξε η ενσωμάτωση της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ μέσω της ΚΥΑ 5673/400/1997, με την οποία καθορίστηκαν τα βασικά μέτρα και οι όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων στη χώρα (Council of the European Communities, 1991). Στη συνέχεια, η πολιτική προστασίας και διαχείρισης των υδάτων

ενισχύθηκε με τον Ν. 3199/2003, ο οποίος εναρμόνισε την ελληνική νομοθεσία με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ, καθώς και με το Π.Δ. 51/2007 που εξειδίκευσε τα μέτρα ολοκληρωμένης προστασίας και διαχείρισης των υδάτων (Ν. 3199/2003· Π.Δ. 51/2007). Το ειδικό πλαίσιο για την επαναχρησιμοποίηση διαμορφώθηκε ουσιαστικά με την ΚΥΑ οικ.145116/2011, η οποία καθόρισε τα μέτρα, τους όρους και τις διαδικασίες για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στην Ελλάδα (Council of the European Communities, 1991). Η σημασία της συγκεκριμένης απόφασης είναι ιδιαίτερη, καθώς μετατόπισε τη λογική της διαχείρισης λυμάτων από την απλή επεξεργασία και διάθεση προς μια προσέγγιση ανάκτησης και αξιοποίησης πόρων.

3.3.1 Κατηγορίες επιτρεπόμενων χρήσεων

Το ισχύον πλαίσιο αναγνωρίζει διάφορες μορφές προγραμματισμένης επαναχρησιμοποίησης. Οι σημαντικότερες αφορούν τη γεωργική χρήση μέσω άρδευσης, την αστική και περιαστική χρήση, τη βιομηχανική χρήση και, υπό αυστηρές προϋποθέσεις, την τροφοδότηση ή τον εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων. Η διαφοροποίηση αυτή είναι ουσιώδης, καθώς κάθε κατηγορία χρήσης συνδέεται με διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας και με διαφορετικό επίπεδο κινδύνου για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Στη γεωργική χρήση γίνεται διάκριση ανάμεσα σε περιορισμένη και απεριόριστη άρδευση. Η περιορισμένη άρδευση αφορά καλλιέργειες χαμηλότερου υγειονομικού κινδύνου, όπως ζωοτροφές, βιομηχανικές καλλιέργειες ή δέντρα υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, ενώ η απεριόριστη άρδευση αφορά πιο ευαίσθητες χρήσεις, όπως λαχανικά, αμπέλια και γενικά καλλιέργειες των οποίων τα προϊόντα μπορούν να καταναλωθούν ωμά. Η νομοθεσία προβλέπει αυστηρότερες ποιοτικές απαιτήσεις για τη δεύτερη κατηγορία, ακριβώς λόγω της αυξημένης πιθανότητας άμεσης έκθεσης του ανθρώπου.

Η αστική και περιαστική χρήση περιλαμβάνει εφαρμογές όπως η άρδευση χώρων πρασίνου, πάρκων, αλσών, νησίδων αυτοκινητοδρόμων, χώρων αναψυχής, καθώς και χρήσεις όπως ο καθαρισμός οδών και η πυρόσβεση. Η βιομηχανική χρήση αναφέρεται κυρίως σε νερά ψύξης, σε τεχνικές διεργασίες και σε άλλες συναφείς χρήσεις, υπό την προϋπόθεση ότι δεν σχετίζονται με προϊόντα ανθρώπινης κατανάλωσης (Council of the European Communities, 1991).

3.3.2 Ποιοτικές προδιαγραφές και τεχνικά κριτήρια

Ένα από τα κεντρικά χαρακτηριστικά του ελληνικού πλαισίου είναι η σύνδεση της χρήσης του ανακτημένου νερού με συγκεκριμένες ποιοτικές προδιαγραφές. Η νομοθεσία ορίζει όρια για μικροβιολογικές και φυσικοχημικές παραμέτρους, καθώς και για μέταλλα, ιχνοστοιχεία και άλλες ουσίες που ενδέχεται να επηρεάσουν είτε τη δημόσια υγεία είτε την καταλληλότητα του νερού για τη συγκεκριμένη χρήση. Για την περιορισμένη άρδευση, τη βιομηχανική χρήση ως νερό ψύξης μιας χρήσης και τον εμπλουτισμό υπόγειου υδροφορέα μέσω κατάλληλου εδαφικού στρώματος, τίθεται ως βασικό μικροβιολογικό όριο διάμεση τιμή *Escherichia coli* 200 EC/100 mL, ενώ για τα BOD5 και τα αιωρούμενα στερεά παραπέμπεται στις απαιτήσεις της ΚΥΑ 5673/400/1997. Για την απεριόριστη άρδευση και τη βιομηχανική χρήση πλην νερού ψύξης μιας χρήσης, τα όρια γίνονται σαφώς αυστηρότερα, με *Escherichia coli* 5 EC/100 mL για το 80% των δειγμάτων, BOD5 10 mg/L, SS 10 mg/L και θολότητα 2 NTU (Ελληνική Δημοκρατία, 2011). Ακόμη αυστηρότερες είναι οι απαιτήσεις για αστική και περιαστική χρήση και για εμπλουτισμό σε γεωτρήσεις, όπου το όριο του *Escherichia coli* μειώνεται σε 2 EC/100 mL για το 80% των δειγμάτων, με τις ίδιες απαιτήσεις για BOD5, SS και θολότητα (Council of the European Communities, 1991). Οι απαιτήσεις που θέτει η ελληνική νομοθεσία ως προς τα μικροβιολογικά και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του ανακτημένου νερού, καθώς και το ελάχιστο απαιτούμενο επίπεδο επεξεργασίας για κάθε κατηγορία χρήσης, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 2.

Πίνακας 7 Όρια ποιότητας και απαιτήσεις επεξεργασίας ανακτημένου νερού για διαφορετικές χρήσεις επαναχρησιμοποίησης σύμφωνα με την ΚΥΑ 145116/2011

Χρήση ανακτημένου νερού	<i>Escherichia coli</i>	BOD5 (mg/L)	SS (mg/L)	Θολότητα (NTU)	Ελάχιστη επεξεργασία
Περιορισμένη άρδευση	200 EC/100 mL (διάμεση τιμή)	σύμφωνα με ΚΥΑ 5673/400/1997	σύμφωνα με ΚΥΑ 5673/400/1997	δεν αναφέρεται σαφώς	Δευτεροβάθμια επεξεργασία και απολύμανση
Βιομηχανική χρήση - νερό ψύξης μιας χρήσης	200 EC/100 mL (διάμεση τιμή)	σύμφωνα με ΚΥΑ 5673/400/1997	σύμφωνα με ΚΥΑ 5673/400/1997	δεν αναφέρεται σαφώς	Δευτεροβάθμια επεξεργασία και απολύμανση

Χρήση ανακτημένου νερού	<i>Escherichia coli</i>	BOD5 (mg/L)	SS (mg/L)	Θολότητα (NTU)	Ελάχιστη επεξεργασία
Εμπλουτισμός υπόγειου υδροφορέα με διήθηση μέσω κατάλληλου εδαφικού στρώματος	200 EC/100 mL (διάμεση τιμή)	σύμφωνα με ΚΥΑ 5673/400/1997	σύμφωνα με ΚΥΑ 5673/400/1997	δεν αναφέρεται σαφώς	Δευτεροβάθμια επεξεργασία, απολύμανση και κατά περίπτωση τεκμηρίωση κατακράτησης οργανικών από το έδαφος
Απεριόριστη άρδευση	5 EC/100 mL για το 80% των δειγμάτων	10	10	2	Προχωρημένη επεξεργασία και απολύμανση
Βιομηχανική χρήση πλην νερού ψύξης μιας χρήσης	5 EC/100 mL για το 80% των δειγμάτων	10	10	2	Προχωρημένη επεξεργασία και απολύμανση
Αστική και περιαστική χρήση	2 EC/100 mL για το 80% των δειγμάτων	10	10	2	Προχωρημένη επεξεργασία υψηλού επιπέδου και απολύμανση
Εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων με γεωτρήσεις	2 EC/100 mL για το 80% των δειγμάτων	10	10	2	Προχωρημένη επεξεργασία, συνήθως με μεμβράνες ή ισοδύναμο σύστημα, και απολύμανση

Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται και στις συγκεντρώσεις αζώτου, ειδικά όταν η επαναχρησιμοποίηση συνδέεται με ευπαθής στη νιτρορύπανση περιοχές ή με τον εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων. Στις περιπτώσεις αυτές προβλέπεται απομάκρυνση αζώτου μέσω νιτροποίησης - απονιτροποίησης, έτσι ώστε το αμμωνιακό άζωτο να είναι μικρότερο από 2 mg/L και το ολικό άζωτο μικρότερο από 15 mg/L (Council of the European Communities, 1991). Οι ειδικότερες απαιτήσεις του πλαισίου αυτού αποτυπώνονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8 Οριακές τιμές αζώτου και απαιτήσεις επεξεργασίας για εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων σύμφωνα με την ΚΥΑ 145116/2011

Περίπτωση	Απαίτηση
Γενική περίπτωση περιορισμένης άρδευσης / χρήσεων	Οι συγκεντρώσεις αζώτου στην εκροή πρέπει να διατηρούνται χαμηλότερα από 45 mg/L
Περιπτώσεις μεγάλης αποθήκευσης, άρδευσης σε ευπρόσβλητες στη νιτρορύπανση ζώνες ή εμπλουτισμού υπόγειου υδροφορέα	Οι μέσες συγκεντρώσεις αζώτου πρέπει να μην υπερβαίνουν τα 15 mg/L
Άρδευση σε περιοχές χαρακτηρισμένες ως ευπρόσβλητες λόγω νιτρορύπανσης	Απαιτείται νιτροποίηση - απονιτροποίηση, ώστε το αμμωνιακό άζωτο < 2 mg/L και το ολικό άζωτο < 15 mg/L
Αστική/περιαστική χρήση και εμπλουτισμός με γεωτρήσεις	Απαιτείται επίσης απομάκρυνση αζώτου, ώστε το αμμωνιακό άζωτο < 2 mg/L και το ολικό άζωτο < 15 mg/L

3.3.3 Αδειοδότηση, παρακολούθηση και έλεγχος

Η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στην Ελλάδα προϋποθέτει ειδική διοικητική άδεια, η οποία εκδίδεται από την αρμόδια Αποκεντρωμένη Διοίκηση, μετά από εισήγηση της Διεύθυνσης Υδάτων και γνωμοδοτήσεις των κατά περίπτωση αρμόδιων υπηρεσιών. Για την έκδοση της άδειας απαιτείται, μεταξύ άλλων, η ύπαρξη νόμιμης λειτουργίας της εγκατάστασης επεξεργασίας, η τήρηση των απαιτούμενων ποιοτικών προδιαγραφών και, όπου απαιτείται, η προηγούμενη περιβαλλοντική αδειοδότηση της σχετικής δραστηριότητας. Παράλληλα, προβλέπεται η υποβολή μελετών σχεδιασμού και εφαρμογής, οι οποίες εξετάζουν το υδατικό ισοζύγιο, τις αποστάσεις από υδροληψίες, τις ανάγκες παρακολούθησης, τα πρόσθετα μέτρα προστασίας και τις ενδεχόμενες επιπτώσεις στην περιοχή εφαρμογής. Η νομοθεσία επιβάλλει επίσης συστηματικές δειγματοληψίες, καταγραφή αποτελεσμάτων, τήρηση αρχείων και δυνατότητα διενέργειας τακτικών και έκτακτων ελέγχων από τις αρμόδιες υπηρεσίες. Σε περίπτωση μη συμμόρφωσης προβλέπονται κυρώσεις, ενώ ενεργοποιείται και το γενικό καθεστώς περιβαλλοντικής ευθύνης (Council of the European Communities, 1991).

Συμπεράσματα

Το ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αστικών αποβλήτων έχει σαφή δομή και τεχνική εξειδίκευση. Η σύνδεσή του με το γενικότερο δίκαιο για τα ύδατα και για την επεξεργασία αστικών λυμάτων δείχνει ότι η επαναχρησιμοποίηση αντιμετωπίζεται ως τμήμα μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής διαχείρισης του νερού και όχι ως αποσπασματική τεχνική επιλογή (Council of the European Communities, 1991) . Μέσα από το σύστημα αυτό καθορίζονται οι επιτρεπόμενες χρήσεις, οι ποιοτικές απαιτήσεις, οι διαδικασίες αδειοδότησης και οι υποχρεώσεις παρακολούθησης, με βασικό κριτήριο την προστασία του.

3.3.4 Υφιστάμενες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ)

Στην Ελλάδα λειτουργεί σημαντικός αριθμός εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, κυρίως δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. Ωστόσο, μόνο περιορισμένος αριθμός αυτών διαθέτει τριτοβάθμια επεξεργασία κατάλληλη για επαναχρησιμοποίηση. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις βρίσκονται κοντά σε αστικά κέντρα, γεγονός που δυσχεραίνει τη μεταφορά των εκροών σε αγροτικές περιοχές (European Parliament & Council of the European Union, 2020) . Πιο συγκεκριμένα στην Ελλάδα βρίσκονται 277 εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Από αυτές οι 217 (78,34%) βρίσκονται σε κατάσταση συμμόρφωσης με την ευρωπαϊκή οδηγία (91/271/ΕΟΚ). Οι μονάδες αυτές έχουν δυναμικότητα 13.706.594 κατοίκων, υπερκαλύπτουν δηλαδή τα οικιακά λύματα και καλύπτουν μέρος από άλλες πηγές (τουρισμός, βιομηχανική δραστηριότητα κ.α.). Αντιθέτως, μόνο 7 μονάδες επαναχρησιμοποιούν με κάποιο τρόπο τα επεξεργασμένα λύματα, δηλαδή μόνο το 2,53%. Αυτές βρίσκονται στο Ηράκλειο Κρήτης, στη Λαμία, στη Θήβα, στη Μάλια, στην Πάρο, στη Νέα Πέραμο (Καβάλας) και στους Μολάους και έχουν παρατίθενται κατά φθίνουσα σειρά δυναμικότητας. Στην πλειοψηφία τους η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων, γίνεται για άρδευση καλλιεργειών, εκτός από τη μονάδα στη Θήβα, όπου χρησιμοποιεί τα λύματα και για εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Σύμφωνα με τα αναρτημένα δεδομένα του υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, η συνολική ποσότητα επεξεργασμένων λυμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άρδευση στη χώρα μας, αντιστοιχεί σε 2,777,546 m³/έτος. Αυτή η ποσότητα θα μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες 5.139 – 4.281 στρεμμάτων με καλλιέργεια ελιάς, θέτοντας ως αρδευτική ανάγκη τα 540 – 648 m³/έτος (ΚΥΑ Φ16/6631/89) (“(PDF) Evaluation of Sparta’s

Municipal Wastewater Treatment Plant's Effluent as an Irrigation Water Source According to Greek Legislation," n.d.). Ο αριθμός των καλλιεργούμενων στρεμμάτων με ελαιόδεντρα ανέρχεται στα 8.000.000, επομένως με τα διαθέσιμα επεξεργασμένα απόβλητα θα μπορούσε να καλυφθεί μόλις το 0,064%. Το ποσοστό αυτό είναι εξαιρετικά χαμηλό, ιδίως αν λάβει κανείς υπόψη τις μειωμένες αποδόσεις λόγω έλλειψης αρδευτικού νερού. Η αξιοποίηση επομένως ενός μεγαλύτερου μέρους των αποβλήτων, θα μπορούσε να συμβάλλει στην ενίσχυση της αγροτικής οικονομίας, τη βελτίωση της ποιότητας και της ποσότητας της παραγωγής και κατ' επέκταση στην ενίσχυση της εξαγωγικής δύναμης της χώρας μας. Η περιορισμένη εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης στην Ελλάδα αποτυπώνεται και στα διαθέσιμα στοιχεία ανά εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, όπου φαίνεται η διαφορά ανάμεσα στις ποσότητες που ήδη επαναχρησιμοποιούνται και στην εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9 Ποσότητες επαναχρησιμοποίησης και εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων ανά μονάδα επεξεργασίας λυμάτων

Μονάδα Επεξεργασία Λυμάτων	Ποσότητα Επαναχρησιμοποίησης (m ³ /έτος)	Εκτίμηση Ετήσιας Παραγωγής ΕΥΑΑ (m ³ /έτος)
Ηρακλείου Κρήτης	-	11.496.215
Θήβα	1.095.000	888.410
Λαμία	464.000	5.212.930
Μάλια	1.200.000	1.496.500
Μολάοι	16.162	86.870
Νέα Πέραμος	43.6594	1.592.860
Πάρος	3.790	500.050

3.4 Βαθμός αξιοποίησης επεξεργασμένων εκροών

Παρά το θεσμικό πλαίσιο και τη διαθεσιμότητα τεχνολογιών, ο βαθμός αξιοποίησης των επεξεργασμένων εκροών για άρδευση στην Ελλάδα παραμένει χαμηλός. Οι βασικοί ανασταλτικοί παράγοντες περιλαμβάνουν το υψηλό κόστος, τη γραφειοκρατία, την κοινωνική αποδοχή και την έλλειψη ολοκληρωμένων στρατηγικών διαχείρισης (Α. Ν. Angelakis et al., 2018).

3.5 Πειραματικές εφαρμογές επεξεργασμένων λυμάτων στην άρδευση καλλιεργειών και φυτοτοξικότητα

Η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αστικών υγρών αποβλήτων για άρδευση αποτελεί μία από τις πλέον μελετημένες πρακτικές βιώσιμης διαχείρισης υδατικών πόρων από τις αρχές του 21ου αιώνα, ιδίως σε περιοχές που αντιμετωπίζουν χρόνια υδατική έλλειψη. Τα τελευταία χρόνια η διεθνής έρευνα επικεντρώθηκε συστηματικά στη διερεύνηση των επιπτώσεων της άρδευσης με επεξεργασμένα λύματα στις καλλιέργειες, λαμβάνοντας υπόψη αγρονομικούς δείκτες, παραμέτρους ποιότητας εδάφους και νερού, καθώς και πιθανούς κινδύνους φυτοτοξικότητας και συσσώρευσης ρύπων (Asano et al., 2007). Σημαντικό μέρος των πειραματικών μελετών αφορά δενδρώδεις καλλιέργειες, καθώς αυτές θεωρούνται κατάλληλες για την εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης λόγω του βαθύ ριζικού τους συστήματος και της περιορισμένης άμεσης επαφής του αρδευτικού νερού με τον εδωδιμο καρπό. Οι Batarseh et al. (2011) διερεύνησαν την επίδραση της άρδευσης ελαιώνων με επεξεργασμένα αστικά λύματα στην Ιορδανία, αξιολογώντας τη συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων και βαρέων μετάλλων στο έδαφος, στα φύλλα και στους καρπούς της ελιάς. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση ανακτημένου νερού οδήγησε σε αύξηση της συγκέντρωσης βασικών θρεπτικών στοιχείων στους καρπούς, όπως του σιδήρου (Fe) κατά 37,3%, του μαγγανίου (Mn) κατά 24,1%, του ασβεστίου (Ca) κατά 14,4% και του μαγνησίου (Mg) κατά 10,9%, ενώ στα φύλλα παρατηρήθηκε αύξηση του Fe κατά 14,6% και του Mn κατά 31,5%. Αντίθετα, δεν διαπιστώθηκε σημαντική συσσώρευση βαρέων μετάλλων στους καρπούς, γεγονός που υποδηλώνει την επιλεκτική πρόσληψη στοιχείων από την ελιά. Σε αντίστοιχο πλαίσιο, οι Bedbabis et al. 2010 σύγκριναν τις επιπτώσεις της διετούς άρδευσης ελαιόδεντρων της ποικιλίας Chemlali με επεξεργασμένα αστικά λύματα στην Τυνησία, εξετάζοντας την ανάπτυξη των δέντρων, την παραγωγικότητα, τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους και τη συγκέντρωση

θρεπτικών στοιχείων και βαρέων μετάλλων. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική αύξηση της παραγωγής ελαιοκάρπου, από 27,6 σε 86,4 kg/δέντρο κατά το πρώτο έτος και από 90,3 σε 154,0 kg/δέντρο κατά το δεύτερο έτος, συγκριτικά με την άρδευση με νερό γεώτρησης. Παράλληλα, παρατηρήθηκε σημαντικός εμπλουτισμός του εδάφους και των φύλλων σε άζωτο (N), φώσφορο (P) και κάλιο (K), γεγονός που υποδηλώνει ότι τα επεξεργασμένα λύματα λειτούργησαν ταυτόχρονα ως μέσο άρδευσης και λίπανσης. Επιπλέον, καταγράφηκε μικρή αλλά στατιστικά σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων μαγγανίου (Mn) και ψευδαργύρου (Zn) στο έδαφος και στα φύλλα, χωρίς όμως να παρατηρηθεί συσσώρευση καδμίου (Cd) ή μολύβδου (Pb) ούτε εμφάνιση συμπτωμάτων φυτοτοξικότητας. Οι συγγραφείς και σε αυτήν την περίπτωση κατέληξαν ότι η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια στην ελαιοκαλλιέργεια σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα με προϋπόθεση τη συστηματική παρακολούθηση της ποιότητας του αρδευτικού νερού και την επιβάρυνση του εδάφους.

Αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα έχουν παρουσιαστεί και για λαχανοκομικές καλλιέργειες. Σε μελέτη στην Ελλάδα, αξιολογήθηκε η άρδευση μαρουλιού (*Lactuca sativa*) και κρεμμυδιού (*Allium cepa*) με τριτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μαρούλι συσσώρευσε υψηλότερες συγκεντρώσεις μαγγανίου (Mn: 177,5 µg/g ξηρής ουσίας), ψευδαργύρου (Zn: 70,7 µg/g), σιδήρου (Fe: 165,6 µg/g) και χαλκού (Cu: 15,3 µg/g) σε σύγκριση με το κρεμμύδι (Mn: 17,5 µg/g, Zn: 30,2 µg/g, Fe: 38,6 µg/g, Cu: 6,87 µg/g), γεγονός που αποδόθηκε στις διαφορετικές φυσιολογικές ιδιότητες των δύο ειδών. Ωστόσο, οι διαφορές μεταξύ της άρδευσης με επεξεργασμένα λύματα, οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα επεξεργασμένα αστικά λύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια για την άρδευση των συγκεκριμένων καλλιεργειών. Σε μεταγενέστερη μελέτη, σε καλλιέργεια μπρόκολου (*Brassica oleracea* var. *italica*) και λάχανων Βρυξελλών (*Brassica oleracea* var. *Gemmifera*) τα αποτελέσματα έδειξαν μη στατιστικά σημαντικές διαφορές στη συσσώρευση μετάλλων στα βρώσιμα μέρη των φυτών, όμως καταγράφηκαν υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων στο έδαφος και στα φύλλα. Βάση των παραπάνω αναδεικνύεται ότι η επαναχρησιμοποίηση εξαρτάται από την ποιότητα της εκροής και όχι μόνο από το είδος της καλλιέργειας.

Εκτεταμένη ερευνητική δραστηριότητα έχει καταγραφεί και σε κτηνοτροφικές καλλιέργειες και σιτηρά, όπου ο υγειονομικός κίνδυνος θεωρείται χαμηλότερος. Οι Rusan et al. (2007) διεξήγαγαν

μακροχρόνιο πείραμα διάρκειας 10 ετών στην Ιορδανία, με άρδευση κριθαριού, σόργου, καλαμποκιού κ.α. μέσω επεξεργασμένων αστικών λυμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συνεχής εφαρμογή επεξεργασμένων λυμάτων αύξησε σημαντικά την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία και βασικά θρεπτικά στοιχεία (N, P και K), βελτιώνοντας τη γονιμότητα και αυξάνοντας τη βιομάζα των φυτών σε σχέση με την άρδευση με γλυκό νερό. Μάλιστα αναφέρεται ότι η εφαρμογή επεξεργασμένων λυμάτων μέσω άρδευσης μπορεί να παρέχει ποσότητες αζώτου (N), φωσφόρου (P) και καλίου (K) που αντιστοιχούν έως και σε 4,10 και 8 φορές αντίστοιχα, τις απαιτήσεις λίπανσης κτηνοτροφικών καλλιεργειών. Παράλληλα, παρατηρήθηκε αύξηση της αλατότητας και συσσώρευση ορισμένων μικροθρεπτικών στοιχείων στο επιφανειακό έδαφος, ενώ οι συγκεντρώσεις Pb και Cd παρέμειναν εντός αποδεκτών ορίων. Παρά ταύτα, δεν παρατηρήθηκαν άμεσα φαινόμενα φυτοτοξικότητας, ενώ οι ερευνητές κατέληξαν ότι με κατάλληλα μέτρα διαχείρισης, όπως την περιοδική έκπλυση του εδάφους, η πρακτική μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια.

Επιπλέον, πρόσφατες μελέτες επικεντρώνονται στη συσσώρευση οργανικών μικρορυπαντών και φαρμακευτικών ενώσεων στους φυτικούς ιστούς. Αν και ορισμένες ενώσεις μπορούν να προσληφθούν από τα φυτά, τα επίπεδα που ανιχνεύονται στις περισσότερες περιπτώσεις είναι χαμηλά και δεν θεωρούνται επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία, ιδίως όταν τηρούνται οι κανονιστικές απαιτήσεις ποιότητας νερού (WHO, 2017; European Union, 2020). Οι Christou et al. (2017) πραγματοποίησαν πολυετές πείραμα πεδίου στην Κύπρο σε καλλιέργεια τομάτας. Η άρδευση έγινε με τριτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα. Μετρήθηκαν αγρονομικοί δείκτες, συγκεντρώσεις οργανικών μικρορυπαντών στο έδαφος και στους καρπούς, καθώς και ενδείξεις φυτοτοξικότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ανάπτυξη των φυτών ήταν συγκρίσιμη με εκείνη φυτών που αρδεύτηκαν με συμβατικό νερό, ενώ οι συγκεντρώσεις φαρμακευτικών ενώσεων στους εδώδιμους ιστούς ήταν πολύ χαμηλές και δεν παρατηρήθηκαν φυτοτοξικά συμπτώματα. Συμπληρωματικά, οι Jiménez et al. (2010) διεξήγαγαν πειραματικές εφαρμογές σε λαχανοκομικές καλλιέργειες στο Μεξικό, εστιάζοντας κυρίως στη μικροβιολογική ποιότητα και στην υγειονομική ασφάλεια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όταν τα λύματα πληρούσαν τις κατευθυντήριες οδηγίες του WHO και εφαρμόζονταν μέθοδοι άρδευσης που περιορίζουν την επαφή με τον εδώδιμο ιστό,

δεν παρατηρήθηκαν αρνητικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών ούτε ενδείξεις φυτοτοξικότητας.

Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί και στη μελέτη της φυτοτοξικότητας από αυξημένη αλατότητα, από υψηλές συγκεντρώσεις νατρίου ή την παρουσία ιχνοστοιχείων και οργανικών μικρορυπαντών. Πειράματα φυτοτοξικότητας με χρήση επεξεργασμένων λυμάτων έχουν δείξει ότι υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και δείκτη προσρόφησης νατρίου (SAR) μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη βλάστηση και την ανάπτυξη ευαίσθητων ειδών, όπως το φασόλι και το μαρούλι, προκαλώντας μειωμένη φυτρωτικότητα και βιομάζα (Ayers & Westcot, 1985; FAO, 2020). Σε εργαστηριακές δοκιμές φυτοτοξικότητας, όπως δοκιμές βλάστησης σπόρων και ανάπτυξης ριζών (seed germination and root elongation tests), έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση ανεπαρκώς επεξεργασμένων λυμάτων μπορεί να προκαλέσει αναστολή της ανάπτυξης λόγω παρουσίας αμμωνιακού αζώτου, βαρέων μετάλλων ή υπολειμμάτων φυτοφαρμάκων (Mateo-Sagasta et al., 2017). Αντίθετα, όταν τα λύματα υποβάλλονται σε τριτοβάθμια επεξεργασία και απολύμανση, τα αποτελέσματα φυτοτοξικότητας είναι περιορισμένα ή μη ανιχνεύσιμα.

Συνολικά, τα αποτελέσματα των πειραματικών και εφαρμοσμένων ερευνητικών εργασιών καταδεικνύουν ότι η άρδευση με επεξεργασμένα αστικά λύματα μπορεί να αποτελέσει βιώσιμη και ασφαλή πρακτική, υπό την προϋπόθεση ότι εφαρμόζονται κατάλληλα επίπεδα επεξεργασίας, ορθές γεωργικές πρακτικές και συνεχής παρακολούθηση της ποιότητας του νερού και του εδάφους. Η ενσωμάτωση δοκιμών φυτοτοξικότητας και μακροχρόνιων πειραμάτων πεδίου αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για την τεκμηρίωση της ασφάλειας και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων επαναχρησιμοποίησης.

4. Διεθνείς πρακτικές επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων

4.1 Ιταλία

Η Ιταλία αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ευρωπαϊκής χώρας όπου η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων για γεωργικούς σκοπούς έχει αναπτυχθεί σε επιλεγμένες περιοχές, χωρίς ωστόσο να έχει επιτευχθεί η πλήρης αξιοποίηση του διαθέσιμου δυναμικού. Σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε ιταλικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, η συνολική ετήσια ροή εκροών που θα μπορούσε δυνητικά να διατεθεί για επαναχρησιμοποίηση εκτιμάται σε περίπου 2.400 Mm³/έτος (European Commission. Directorate General for the Environment. & Technical University of Munich., 2017). Παρά το σημαντικό αυτό δυναμικό, το ανακτημένο νερό χρησιμοποιείται σήμερα κυρίως για γεωργική άρδευση και καλύπτει έκταση μεγαλύτερη των 4.000 εκταρίων σε εθνικό επίπεδο. Αν και δεν υφίσταται ένα οργανωμένο εθνικό δίκτυο επαναχρησιμοποίησης λυμάτων, έχουν καταγραφεί πολυάριθμες μελέτες περίπτωσης που τεκμηριώνουν την πρακτική εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων τόσο στη βόρεια όσο και στη νότια Ιταλία. Στις βόρειες περιφέρειες, όπως η Εμίλια-Ρομάνια (ΕΕΛ Reggio Emilia), η Λομβαρδία (ΕΕΛ Milano-Nosedo) και το Πιεμόντε (ΕΕΛ Torino), παράγονται σημαντικοί όγκοι επεξεργασμένων εκροών, οι οποίοι διατίθενται σε τοπικούς χρήστες, κυρίως για αρδευτικές ανάγκες. Αντίστοιχα, σε νότιες περιοχές της χώρας, όπως η Απουλία και η Σικελία, έχουν υλοποιηθεί πιλοτικά έργα και εφαρμογές σε πραγματική κλίμακα (Lonigro et al., 2016; Lopez et al., 2006). Η συμμόρφωση με τα ισχύοντα ιταλικά πρότυπα ποιότητας προϋποθέτει την εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας, γεγονός που επηρεάζει σημαντικά την οικονομική βιωσιμότητα των έργων επαναχρησιμοποίησης. Επιπλέον, ένα από τα βασικά εμπόδια αποτελεί η απαίτηση παρακολούθησης μεγάλου αριθμού παραμέτρων ποιότητας (άνω των 50) οι οποίες συχνά απαιτούν υψηλή συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων, αυξάνοντας το λειτουργικό κόστος. Ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα αφορά το κανονιστικό πλαίσιο, καθώς δεν υφίσταται διαφοροποίηση μεταξύ των καλλιεργειών που αρδεύονται με ανακτημένο νερό (π.χ. περιορισμένη ή απεριόριστη άρδευση), ούτε λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των διαφορετικών τεχνικών

άρδευσης στη μείωση των υγειονομικών κινδύνων, όπως η υπόγεια άρδευση, η στάγδην άρδευση ή η άρδευση με καταιονισμό.

Στις παράκτιες περιοχές της Ιταλίας, η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων αναγνωρίζεται ως ένα δυνητικά αποτελεσματικό εργαλείο για τον μετριασμό της υφαλμύρωσης των υπόγειων υδροφορέων, η οποία προκαλείται από την υπεράντληση και τη διείσδυση θαλασσινού νερού. Ωστόσο, η απευθείας έγχυση επεξεργασμένων εκροών σε βαθιούς υδροφορείς απαγορεύεται από την ιταλική νομοθεσία. Ως εκ τούτου, ο τεχνητός εμπλουτισμός των υπόγειων υδάτων μπορεί να επιτευχθεί αποκλειστικά μέσω συστημάτων επιφανειακής διάχυσης και διήθησης.

Η επαναχρησιμοποίηση νερού στην Ιταλία ρυθμίζεται νομοθετικά ήδη από το 1977 μέσω του Νόμου για την Προστασία των Υδάτων (CITAI). Το 2003 εκδόθηκε νέο κανονιστικό πλαίσιο (Διάταγμα Υπουργείου Περιβάλλοντος 185/2003), το οποίο εφαρμόζεται στη γεωργική άρδευση, καθώς και στην επαναχρησιμοποίηση μη πόσιμου αστικού και βιομηχανικού νερού. Το πλαίσιο αυτό υιοθετεί μια ιδιαίτερα αυστηρή προσέγγιση, με αποτέλεσμα πολλά από τα ποιοτικά κριτήρια του ανακτημένου νερού να είναι αντίστοιχα με εκείνα του πόσιμου νερού. Πρόσφατα πιλοτικά έργα και ερευνητικές μελέτες έχουν αναδείξει τη σημασία της ανάκτησης θρεπτικών συστατικών από τα επεξεργασμένα λύματα, καθώς και την ανάγκη υιοθέτησης προτύπων και τεχνολογιών προσαρμοσμένων στις επιμέρους εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης, αντί της οριζόντιας εφαρμογής ενιαίων, αυστηρών ορίων (Vergine et al., 2017).

4.2 Ιορδανία

Η Ιορδανία αποτελεί ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά παραδείγματα χωρών με εξαιρετικά περιορισμένους υδατικούς πόρους, όπου η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων έχει αναδειχθεί σε βασικό πυλώνα της εθνικής στρατηγικής διαχείρισης νερού. Η χώρα συγκαταλέγεται μεταξύ των τεσσάρων χωρών παγκοσμίως με το υψηλότερο επίπεδο υδατικής έλλειψης, γεγονός που έχει οδηγήσει τόσο τις κυβερνητικές όσο και τις μη κυβερνητικές αρχές στην ενεργή προώθηση της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων ως εναλλακτικής πηγής υδατικών πόρων.

Μέχρι το 2017, στην Ιορδανία λειτουργούσαν περισσότερες από 30 εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ), καλύπτοντας μια χώρα έκτασης 89.341 km² με πληθυσμό περίπου 9,5 εκατομμύρια κατοίκους (Ministry of Water and Irrigation.,2016). Η πρόσβαση σε ασφαλείς υπηρεσίες αποχέτευσης αφορά άνω του 93% του πληθυσμού, εκ των οποίων περίπου το 63% εξυπηρετείται μέσω δικτύων αποχέτευσης και εγκαταστάσεων επεξεργασίας. Το ποσοστό αυτό αναμένεται να αυξηθεί στο 80% έως το 2030, στο πλαίσιο των εθνικών αναπτυξιακών στόχων.

Η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων στην Ιορδανία παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλό βαθμό αξιοποίησης σε σύγκριση με άλλες χώρες της Μεσογείου. Περίπου το 91% των επεξεργασμένων εκροών επαναχρησιμοποιείται στη γεωργία, συμβάλλοντας κατά 17% (περίπου 175 Mm³/έτος) στον ετήσιο υδατικό προϋπολογισμό της χώρας, ο οποίος ανέρχεται συνολικά σε 1.027 Mm³. Τα επεξεργασμένα λύματα καλύπτουν περίπου το 25% των συνολικών αρδευτικών αναγκών, οι οποίες εκτιμώνται σε 700 Mm³/έτος, ενώ αντιστοιχούν σε ποσοστό περίπου 60% του διαθέσιμου ετήσιου υδατικού ισοζυγίου. Η χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων πραγματοποιείται κυρίως στις περιοχές εντός και πέριξ των εγκαταστάσεων επεξεργασίας, βάσει συμφωνιών που έχουν συναφθεί μεταξύ των αρμόδιων αρχών, των αγροτών και άλλων θεσμικών φορέων. Ένα σημαντικό μέρος των εκροών διοχετεύεται σε φυσικούς αποδέκτες, όπως οι ξηροπόταμοι, και καταλήγει σε ταμιευτήρες. Οι μεγαλύτερες ΕΕΛ της χώρας, όπως οι Khirbet As Samra, Jerash και Baq'a, απορρίπτουν περισσότερο από το 70% των συνολικών επεξεργασμένων λυμάτων στον ταμιευτήρα King Talal (King Talal Reservoir – KTR), όπου τα λύματα αναμειγνύονται με τα όμβρια ύδατα. Ο ταμιευτήρας αυτός αποτελεί κρίσιμο υδατικό πόρο για τη γεωργία της κεντρικής και νότιας κοιλάδας του Ιορδάνη, καθώς οι αγρότες της περιοχής δεν διαθέτουν εναλλακτικές πηγές επιφανειακού νερού. Στο ισχύον πλαίσιο, τα επεξεργασμένα λύματα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την άρδευση μη βρώσιμων καλλιεργειών, όπως ζωοτροφές, φυτώρια και δένδρα, περιορίζοντας έτσι τον άμεσο υγειονομικό κίνδυνο (Ministry of Water and Irrigation.,2016). Οι κυριότερες τεχνολογίες επεξεργασίας που εφαρμόζονται στις ιορδανικές ΕΕΛ είναι τα συστήματα ενεργού ιλύος, ενώ σε μικρότερο βαθμό χρησιμοποιούνται βιολογικά φίλτρα και εκτεταμένος αερισμός. Οι εγκαταστάσεις σχεδιάζονται και λειτουργούν κατά τρόπο ώστε οι εκροές να πληρούν τα εθνικά πρότυπα ποιότητας για επαναχρησιμοποίηση. Η μεταφορά των επεξεργασμένων λυμάτων μέσω φυσικών ροών προς τους ταμιευτήρες

προσφέρει ένα επιπλέον επίπεδο φυσικής αυτοκάθαρσης, μειώνοντας περαιτέρω το μικροβιακό φορτίο πριν από την τελική χρήση. Ωστόσο, σε ορισμένες εγκαταστάσεις, η αυξημένη αλατότητα των εκροών, που οφείλεται στη συμμετοχή βιομηχανικών αποβλήτων ή απορριμμάτων άλμης από μονάδες αφαλάτωσης, αποτελεί σημαντική πρόκληση και απαιτεί ειδική διαχείριση. Οι αγρότες στην Ιορδανία εφαρμόζουν κυρίως στάγδην άρδευση σε συνδυασμό με εδαφοκάλυψη, προκειμένου να περιοριστεί η εξάτμιση, να βελτιωθεί η μικροβιολογική ποιότητα των καλλιεργειών και να μειωθεί ο κίνδυνος επιμόλυνσης. Σε περιοχές όπου τα επεξεργασμένα λύματα χρησιμοποιούνται απευθείας από τις ΕΕΛ, όπως στην περιοχή Wadi Musa, η χρήση περιορίζεται αποκλειστικά σε καλλιέργειες κτηνοτροφικών φυτών. Η επέκταση της γεωργικής παραγωγής στη χώρα θεωρείται εφικτή μόνο υπό την προϋπόθεση της περαιτέρω αύξησης της διαθεσιμότητας επεξεργασμένων λυμάτων.

Η εκτεταμένη επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων έχει συμβάλει σημαντικά στη μείωση της πίεσης επί των ανανεώσιμων γλυκών υδάτων της Ιορδανίας. Παράλληλα, η μετάβαση από σηπτικούς βόθρους σε οργανωμένα συστήματα αποχέτευσης και επεξεργασίας έχει περιορίσει τον κίνδυνο ρύπανσης εδαφών και υπόγειων υδροφορέων. Αν και η παραγόμενη ιλύς είναι περιορισμένη, χαρακτηρίζεται από καλή ποιότητα και δύναται να αξιοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό ή λίπασμα, υπό την προϋπόθεση της θέσπισης και εφαρμογής κατάλληλου νομοθετικού πλαισίου.

Το κανονιστικό και θεσμικό πλαίσιο της Ιορδανίας περιλαμβάνει πολλαπλά σύνολα προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών για τα λύματα, την ιλύ, τα εδάφη και τις καλλιέργειες, τα οποία έχουν θεσπιστεί από αρμόδιους φορείς, όπως η Αρχή Υδάτων της Ιορδανίας και το Υπουργείο Υδάτων και Άρδευσης. Οι πολιτικές και οι νόμοι που διέπουν την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων επικαιροποιούνται συστηματικά, με στόχο την αύξηση τόσο της ποσότητας όσο και της ποιότητας των διαθέσιμων εκροών. Ιδιαίτερη σημασία έχει η υιοθέτηση ενός εθνικού πλαισίου αποκεντρωμένης διαχείρισης λυμάτων, το οποίο αποσκοπεί στην επίτευξη του Στόχου Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών για καθολική πρόσβαση σε ύδρευση και αποχέτευση. Το πλαίσιο αυτό ενισχύει την παροχή υπηρεσιών σε αγροτικές περιοχές, βελτιώνει τη δημόσια υγεία και αυξάνει τη δυνατότητα υποκατάστασης γλυκού νερού από επεξεργασμένα λύματα.

4.3 Γαλλία

Η Γαλλία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα με εκτεταμένες υποδομές επεξεργασίας αστικών λυμάτων, αλλά με περιορισμένη αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών για σκοπούς επαναχρησιμοποίησης. Παρότι διαθέτει περισσότερες από 21.000 εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και υψηλό ποσοστό κάλυψης του πληθυσμού, λιγότερο από το 1% των επεξεργασμένων λυμάτων επαναχρησιμοποιείται σε εθνικό επίπεδο (Angelakis & Gikas, 2014; European Commission. Directorate General for the Environment. & Technical University of Munich., 2017).

Ιστορικά, η σχετική αφθονία υδατικών πόρων στη Γαλλία και η ευρεία διαθεσιμότητα επιφανειακών και υπόγειων υδάτων δεν δημιούργησαν επείγουσα ανάγκη για την ανάπτυξη πρακτικών επαναχρησιμοποίησης. Ωστόσο, τα τελευταία έτη η κλιματική αλλαγή, η αυξανόμενη συχνότητα ξηρασιών και η εντατικοποίηση της γεωργικής παραγωγής έχουν οδηγήσει σε αυξημένες πιέσεις στους υδατικούς πόρους, ιδιαίτερα στις νότιες και μεσογειακές περιοχές της χώρας (European Parliament & Council of the European Union, 2020) .

Η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων στη Γαλλία αφορά κυρίως τη γεωργική άρδευση και τη χρήση σε αστικά περιβάλλοντα, όπως η άρδευση δημόσιων χώρων πρασίνου και αθλητικών εγκαταστάσεων. Σε μικρότερη κλίμακα, εφαρμόζεται και σε βιομηχανικές χρήσεις, κυρίως για ψύξη και πλύση εξοπλισμού (Lazarova et al., 2012; Lazarova & Bahri, 2015). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης στην άρδευση αμπελώνων και δενδροκαλλιεργειών στη νότια Γαλλία, όπου οι υδατικές ανάγκες είναι αυξημένες κατά τη θερινή περίοδο (Vergine et al., 2017). Παρά την τεχνική δυνατότητα, η ανάπτυξη έργων επαναχρησιμοποίησης στη Γαλλία παρεμποδίζεται από ένα αυστηρό κανονιστικό πλαίσιο. Μέχρι πρόσφατα, τα εθνικά πρότυπα ποιότητας για το ανακτημένο νερό ήταν ιδιαίτερα περιοριστικά, με μικροβιολογικά όρια συχνά συγκρίσιμα με εκείνα του πόσιμου νερού. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανάγκη εφαρμογής προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας, αυξάνοντας σημαντικά το κόστος κατασκευής και λειτουργίας των έργων (Angelakis et al., 2018; Lazarova & Bahri, 2015). Η εφαρμογή του Κανονισμού (ΕΕ) 2020/741 για την ελάχιστη ποιότητα νερού επαναχρησιμοποίησης στη γεωργία αναμένεται να λειτουργήσει ως καταλύτης για την περαιτέρω ανάπτυξη της επαναχρησιμοποίησης. Ο κανονισμός αυτός εισάγει μια πιο ευέλικτη προσέγγιση,

βασισμένη στην εκτίμηση κινδύνου και στη διαφοροποίηση των απαιτήσεων ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας και τη μέθοδο άρδευσης (European Parliament & Council, 2020).

Η κοινωνική αποδοχή αποτελεί επίσης κρίσιμο παράγοντα για την υλοποίηση έργων επαναχρησιμοποίησης στη Γαλλία. Μελέτες δείχνουν ότι η κοινή γνώμη αντιμετωπίζει με επιφυλακτικότητα τη χρήση ανακτημένου νερού, ιδίως στη γεωργική παραγωγή. Ως εκ τούτου, οι γαλλικές αρχές δίνουν έμφαση στη διαφάνεια, την ενημέρωση του κοινού και την εφαρμογή πιλοτικών έργων επίδειξης, με στόχο την ενίσχυση της εμπιστοσύνης των χρηστών (Dolnicar et al., 2011; Po et al., 2003). Από τεχνολογική άποψη, τα έργα επαναχρησιμοποίησης στη Γαλλία βασίζονται σε προηγμένες διεργασίες επεξεργασίας, όπως MBR, απολύμανση με UV ακτινοβολία και AOPs ώστε να διασφαλίζεται η συμμόρφωση με τα αυστηρά ποιοτικά πρότυπα (Shannon et al., 2008). Παρότι οι τεχνολογίες αυτές εξασφαλίζουν υψηλή ποιότητα εκροής, το αυξημένο ενεργειακό και οικονομικό κόστος περιορίζει την ευρεία εφαρμογή τους, ιδίως σε μικρούς και μεσαίους δήμους.

Συνολικά, η γαλλική εμπειρία αναδεικνύει ότι η επιτυχής εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τεχνολογική επάρκεια, αλλά απαιτεί συνδυασμό θεσμικής ευελιξίας, οικονομικών κινήτρων και κοινωνικής αποδοχής (European Parliament & Council of the European Union, 2020 ; Angelakis et al., 2018).

4.4 Ισπανία

Η Ισπανία αποτελεί μία από τις πλέον εξελιγμένες χώρες παγκοσμίως στον τομέα της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων αστικών λυμάτων, κυρίως λόγω της έντονης υδατικής λειψυδρίας, της άνισης χωρικής κατανομής των υδατικών πόρων και της υψηλής ζήτησης νερού από τον γεωργικό τομέα. Περισσότερο από το 80% της επαναχρησιμοποίησης νερού στη χώρα αφορά γεωργικές εφαρμογές, καθιστώντας την Ισπανία πρωτοπόρο σε ευρωπαϊκό επίπεδο (Angelakis et al., 2018; European Commission, 2018).

Σύμφωνα με εκτιμήσεις, η Ισπανία επαναχρησιμοποιεί ετησίως πάνω από 400 hm³ επεξεργασμένων λυμάτων, αντιπροσωπεύοντας ποσοστό άνω του 10% των συνολικών εκροών από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Το μεγαλύτερο μέρος αυτών των ποσοτήτων

αξιοποιείται για την άρδευση γεωργικών εκτάσεων, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονα ξηροθερμικά χαρακτηριστικά, όπως η Ανδαλουσία, η Μούρθια, η Βαλένθια και οι Κανάριοι Νήσοι (Salgot et al., 2012).

Το κανονιστικό πλαίσιο της Ισπανίας για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υδάτων θεωρείται από τα πλέον ολοκληρωμένα στην Ευρώπη. Το Βασιλικό Διάταγμα 1620/2007 καθορίζει με σαφήνεια τα επιτρεπόμενα επίπεδα ποιότητας για διαφορετικές χρήσεις επαναχρησιμοποίησης, εισάγοντας διαφοροποίηση ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας, τη μέθοδο άρδευσης και το επίπεδο επαφής με τον άνθρωπο (RD 1620/2007). Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην εκτίμηση κινδύνου και θεωρείται πιο ευέλικτη σε σύγκριση με αυστηρά οριζόντια πρότυπα ποιότητας (Angelakis & Gikas, 2014).

Ιδιαίτερη σημασία στην ισπανική εμπειρία έχει η εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας, όπως η τριτοβάθμια επεξεργασία με διήθηση, απολύμανση με UV ακτινοβολία και, σε ορισμένες περιπτώσεις, διεργασίες μεμβρανών. Οι τεχνολογίες αυτές διασφαλίζουν την παραγωγή εκροών κατάλληλων για άρδευση ακόμα και ευαίσθητων καλλιεργειών, όπως κηπευτικά που καταναλώνονται ωμά (Lazarova et al., 2012; Shannon et al., 2008).

Η κοινωνική αποδοχή της επαναχρησιμοποίησης νερού στην Ισπανία είναι γενικά υψηλότερη σε σύγκριση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες, γεγονός που αποδίδεται στη μακροχρόνια εμπειρία εφαρμογής, στη συστηματική ενημέρωση των αγροτών και στην άμεση σύνδεση της επαναχρησιμοποίησης με την οικονομική βιωσιμότητα της γεωργικής παραγωγής. Σε πολλές περιοχές, οι αγρότες θεωρούν το ανακτημένο νερό αξιόπιστη και σταθερή πηγή άρδευσης, ιδίως κατά τις περιόδους ξηρασίας (Po et al., 2005; Salgot et al., 2012). Παρά τα πλεονεκτήματα, η ισπανική εμπειρία δεν στερείται προκλήσεων. Η αυξημένη αλατότητα των επεξεργασμένων λυμάτων σε ορισμένες περιοχές αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για ευαίσθητες καλλιέργειες, ενώ το κόστος κατασκευής και λειτουργίας των τριτοβάθμιων εγκαταστάσεων παραμένει σημαντικό, ιδιαίτερα για μικρούς δήμους. Επιπλέον, η ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης της ποιότητας του νερού απαιτεί οργανωμένους μηχανισμούς ελέγχου και επαρκή χρηματοδότηση (Vergine et al., 2017).

Συνολικά, η Ισπανία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα χώρας όπου η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων έχει ενσωματωθεί στη στρατηγική διαχείρισης υδατικών πόρων και γεωργικής ανάπτυξης. Η εμπειρία αυτή παρέχει πολύτιμα διδάγματα για άλλες μεσογειακές χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, ιδίως όσον αφορά την προσαρμογή του κανονιστικού πλαισίου, την αποδοχή από τους χρήστες και την τεχνικοοικονομική βιωσιμότητα των έργων επαναχρησιμοποίησης (Angelakis et al., 2018).

4.5 Ισραήλ

Το Ισραήλ αποτελεί διεθνώς ένα από τα πιο ώριμα και επιτυχημένα παραδείγματα επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων αστικών λυμάτων, καθώς έχει ενσωματώσει την ανακύκλωση εκροών στη συνολική στρατηγική διαχείρισης υδάτων, με βασικό προσανατολισμό τη γεωργία. Η χώρα έχει αναπτύξει εκτεταμένες υποδομές συλλογής, τριτοβάθμιας επεξεργασίας, αποθήκευσης και διανομής ανακτημένου νερού, ώστε η γεωργική παραγωγή να στηρίζεται σε μια σταθερή και ελεγχόμενη πηγή άρδευσης, ιδιαίτερα σε συνθήκες περιορισμένων φυσικών αποθεμάτων και συχνών ξηρασιών (Marin et al., 2017). Σύμφωνα με διεθνείς τεχνικές αποτιμήσεις, το Ισραήλ επαναχρησιμοποιεί πολύ υψηλό ποσοστό των επεξεργασμένων εκροών του για άρδευση, ενώ η επαναχρησιμοποίηση καλύπτει σημαντικό μέρος της γεωργικής ζήτησης νερού σε εθνικό επίπεδο (Marin et al., 2017; U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

Κεντρικό στοιχείο του ισραηλινού μοντέλου είναι η αξιοποίηση υποδομών μεγάλης κλίμακας και η σύνδεση της επεξεργασίας λυμάτων με μηχανισμούς αποθήκευσης και μεταφοράς. Η πιο χαρακτηριστική εφαρμογή αφορά το σύστημα Shafdan στην ευρύτερη περιοχή του Τελ Αβίβ, όπου οι εκροές μετά από προηγμένη επεξεργασία οδηγούνται σε διεργασία κατεΐσδυσης στο υπέδαφος (soil aquifer treatment) για περαιτέρω «φυσικό φιλτράρισμα» και αποθήκευση, πριν ανακτηθούν και διανεμηθούν σε αγροτικές ζώνες (Marin et al., 2017; U.S. Environmental Protection Agency, 2023). Η προσέγγιση αυτή προσφέρει λειτουργικά πλεονεκτήματα, καθώς επιτρέπει την εποχική εξομάλυνση της παροχής μέσω υπόγειας αποθήκευσης, ενισχύει τη μικροβιολογική ασφάλεια και λειτουργεί ως πρόσθετο «φράγμα» μείωσης οργανικών ρύπων (Marin et al., 2017).

Σε θεσμικό επίπεδο, η ισραηλινή εμπειρία αναδεικνύει ότι η επιτυχία της επαναχρησιμοποίησης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τεχνολογία, αλλά και από την ύπαρξη σταθερού πλαισίου διακυβέρνησης, ισχυρών μηχανισμών ελέγχου ποιότητας και συντονισμού μεταξύ επεξεργασίας, διανομής και γεωργικής χρήσης (Marin et al., 2017). Παράλληλα, οι τεχνικές αποτιμήσεις υπογραμμίζουν ότι προκλήσεις όπως η διαχείριση της αλατότητας και συγκεκριμένων ιόντων (π.χ. χλωριδίων) σε ορισμένα δίκτυα, καθώς και η ανάγκη συνεχούς αναβάθμισης για νέους ρύπους ενδιαφέροντος, παραμένουν κρίσιμες για τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα του συστήματος (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).

4.6 Σιγκαπούρη

Η Σιγκαπούρη αποτελεί διεθνές παράδειγμα αστικού κράτους με περιορισμένους φυσικούς υδατικούς πόρους, το οποίο έχει επενδύσει στρατηγικά στην ανακύκλωση αστικών λυμάτων ως βασικό πυλώνα υδατικής ασφάλειας. Η πιο εμβληματική εφαρμογή είναι το πρόγραμμα NEWater, μέσω του οποίου οι δευτεροβάθμιες εκροές υφίστανται προηγμένη επεξεργασία πολλαπλών σταδίων, συνήθως με ακολουθία μικροδιήθησης ή υπερδιήθησης, αντίστροφης ώσμωσης και UV απολύμανσης, ώστε να παράγεται νερό πολύ υψηλής ποιότητας (Bai et al., 2020). Το παραγόμενο νερό χρησιμοποιείται κυρίως για βιομηχανικές εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων και για έμμεση ενίσχυση πόσιμων αποθεμάτων μέσω εμπλουτισμού ταμιευτήρων (PUB, 2025).

Το NEWater εντάσσεται στη συνολική πολιτική των «Four National Taps», δηλαδή ενός διαφοροποιημένου χαρτοφυλακίου πηγών νερού που περιλαμβάνει τοπικές λεκάνες απορροής, εισαγόμενα ύδατα, αφαλάτωση και ανακύκλωση. Στο πλαίσιο αυτό, η Σιγκαπούρη αντιμετωπίζει την επαναχρησιμοποίηση όχι ως συμπληρωματικό μέτρο, αλλά ως βασική πηγή που συμβάλλει ουσιαστικά στο ισοζύγιο προσφοράς-ζήτησης και ενισχύει την ανθεκτικότητα σε κλιματικές και γεωπολιτικές αβεβαιότητες (PUB, 2025; Ministry of Sustainability and the Environment, 2025; Bai et al., 2020). Επιπλέον, η θεσμική πρακτική της Σιγκαπούρης δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην προληπτική προστασία της ποιότητας εισροών προς τα συστήματα επεξεργασίας, μέσω ελέγχων στις βιομηχανικές απορρίψεις και συστηματικής παρακολούθησης, ώστε να διασφαλίζεται σταθερή ποιότητα προϊόντος και λειτουργική αξιοπιστία (Ministry of Sustainability and the Environment, 2025; PUB, 2025).

4.7 Κύπρος

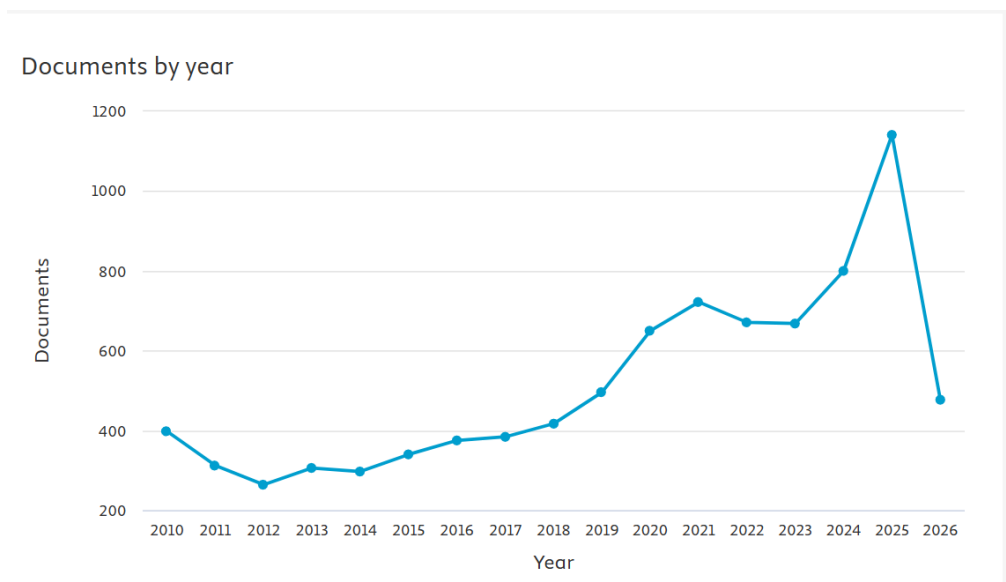
Η Κύπρος αποτελεί εξίσου παράδειγμα επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων στην Ευρώπη, καθώς η υδατική πίεση, η έντονη εποχικότητα των βροχοπτώσεων και οι παρατεταμένες ξηρές περίοδοι οδήγησαν στη στρατηγική αξιοποίηση μη συμβατικών πόρων, συμπεριλαμβανομένου του ανακτημένου νερού. Η επαναχρησιμοποίηση οργανώνεται κεντρικά από το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων (Water Development Department – WDD), το οποίο έχει θεσμικό ρόλο στη διαχείριση της τριτοβάθμιας επεξεργασίας, της αποθήκευσης και της διάθεσης του ανακτημένου νερού, κυρίως για άρδευση (Audit Office of the Republic of Cyprus, 2025).

Σύμφωνα με πρόσφατα στοιχεία που παρουσιάζονται σε τεχνική έκθεση/παρουσίαση για την επαναχρησιμοποίηση στην Κύπρο, κατά το 2021 παρήχθησαν περίπου 22,6 εκατ. m³ επεξεργασμένων εκροών, από τα οποία σημαντικό μέρος αξιοποιήθηκε άμεσα ή έμμεσα για άρδευση, οδηγώντας σε πολύ υψηλό συνολικό επίπεδο αξιοποίησης της εκροής. Οι ίδιες τεχνικές πηγές υπογραμμίζουν ότι το κυπριακό μοντέλο στηρίζεται σε ευρεία εφαρμογή τριτοβάθμιας κατεργασίας (διήθηση και απολύμανση) ώστε να παράγεται νερό κατάλληλο για αρδευτικές χρήσεις με σταθερά χαρακτηριστικά ποιότητας. Η κυπριακή πρακτική αναδεικνύει επίσης την κρισιμότητα των δικτύων μεταφοράς και της οργανωμένης διάθεσης. Η δυνατότητα μεταφοράς του ανακτημένου νερού σε αρδευτικές ζώνες και συλλογικά δίκτυα αποτελεί βασική προϋπόθεση ώστε η επαναχρησιμοποίηση να μετατραπεί από «τοπική λύση κοντά στην ΕΕΛ» σε ουσιαστική συνιστώσα εθνικής υδατικής πολιτικής. Ταυτόχρονα, η εμπειρία της χώρας δείχνει ότι, παρότι η τεχνολογική και θεσμική ωρίμανση μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή αξιοποίηση, παραμένουν προκλήσεις σχετιζόμενες με τη μεταβλητότητα της ζήτησης, τον έλεγχο ορισμένων ποιοτικών παραμέτρων (ιδίως αλατότητας σε συγκεκριμένες περιοχές) και τη διατήρηση συστηματικών προγραμμάτων παρακολούθησης, ώστε να ενισχύεται η εμπιστοσύνη των χρηστών και να διασφαλίζεται η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις (AORC, 2025).

5. Βιβλιομετρική Ανάλυση και Συζήτηση

5.1 Χρονική εξέλιξη των επιστημονικών δημοσιεύσεων

Το χρονικό διάστημα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη βιβλιομετρική ανασκόπηση στην παρούσα εργασία είναι το 2010 - 2026. Κατά το διάστημα αυτό, παρατηρείται σημαντική αύξηση των δημοσιεύσεων/έτος, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένο επιστημονικό ενδιαφέρον για την επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων και την άρδευση με τη χρήση αυτών (Σχήμα 1). Το 2025, αποτέλεσε χρονιά κορυφή με τις περισσότερες δημοσιεύσεις από κάθε άλλο έτος.



Σχήμα 1 Εξέλιξη του αριθμού των δημοσιεύσεων σχετικά με τις λέξεις - κλειδιά στις οποίες βασίστηκε η βιβλιομετρική ανασκόπηση της παρούσας εργασίας (Scopus).

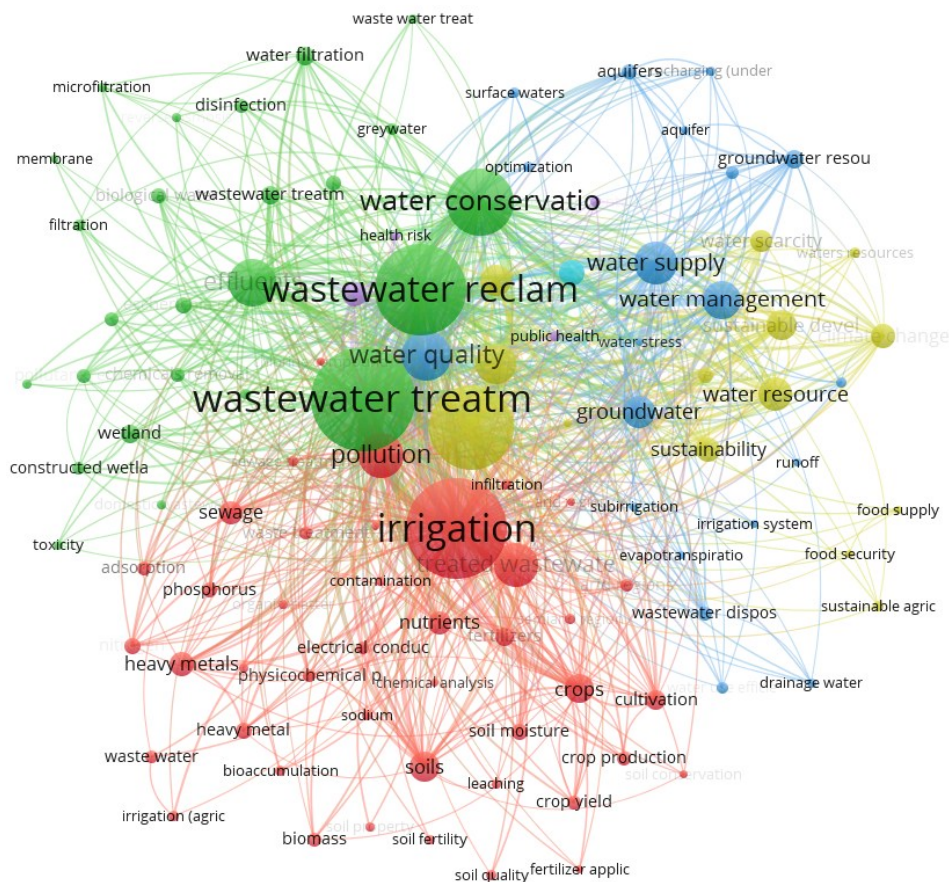
5.2 Χαρτογράφηση και δικτύωση λέξεων-κλειδιών με χρήση του VOSviewer

Από το σύνολο 6.660 δημοσιεύσεων εφαρμόστηκε κατώφλι 50 εμφανίσεων ανά λέξη-κλειδί, οι οποίες μετά από επιπλέον επεξεργασία μέσω αρχείου thesaurus, προέκυψαν 150 λέξεις κλειδιά οι οποίες οργανώθηκαν σε τέσσερα κύριες θεματικές ομάδες. Το Σχήμα 2 παρουσιάζει το δίκτυο συνύπαρξης λέξεων-κλειδιών που δημιουργήθηκε με τη χρήση του VOSviewer. Οι λέξεις-κλειδιά αναλύθηκαν με τη μέθοδο της συνύπαρξης, συμπεριλαμβάνοντας μόνο τους πιο συχνά

χρησιμοποιούμενους όρους. Επιπλέον, συγχωνεύθηκαν συνώνυμες λέξεις-κλειδιά και αφαιρέθηκαν περιττοί όροι, βελτιώνοντας έτσι τη σαφήνεια. Η ανάλυση αποκάλυψε τέσσερις (4) κύριες θεματικές ομάδες.

- Η πρώτη ομάδα (πράσινη) επικεντρώνεται στις τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων και περιλαμβάνει όρους όπως επεξεργασία λυμάτων, ανάκτηση λυμάτων, εκροές, απολύμανση, διήθηση και υγρότοποι. Αυτή η ομάδα αντιπροσωπεύει τις τεχνολογικές και λειτουργικές πτυχές των διαδικασιών επεξεργασίας και ανάκτησης λυμάτων.
- Η δεύτερη ομάδα (κόκκινη) εστιάζει στην αγροτική επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων. Λέξεις-κλειδιά όπως άρδευση, επεξεργασμένα λύματα, καλλιέργειες, εδάφη, θρεπτικά συστατικά, βαρέα μέταλλα και απόδοση καλλιεργειών υποδηλώνουν το εκτεταμένο ερευνητικό ενδιαφέρον για την εφαρμογή ανακτημένου νερού για σκοπούς άρδευσης και τις επιπτώσεις του στα γεωργικά συστήματα.
- Η τρίτη ομάδα (μπλε) σχετίζεται με τη διαχείριση των υδάτινων πόρων και την προστασία των υπόγειων υδάτων. Η παρουσία λέξεων-κλειδιών όπως υπόγεια ύδατα, παροχή νερού, διαχείριση νερού, υδροφορέας και υδάτινοι πόροι υπογραμμίζει τη σημασία της ενσωμάτωσης της επαναχρησιμοποίησης λυμάτων σε ευρύτερα συστήματα διαχείρισης νερού.
- Η τέταρτη ομάδα (κίτρινη) αφορά τη βιωσιμότητα και τη μακροπρόθεσμη διαχείριση των πόρων. Λέξεις-κλειδιά όπως βιώσιμη ανάπτυξη, βιωσιμότητα, έλλειψη νερού και επισιτιστική ασφάλεια καταδεικνύουν το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων ως μέσου για την αντιμετώπιση των παγκόσμιων υδατικών προκλήσεων και την υποστήριξη της βιώσιμης γεωργικής ανάπτυξης.

Συνολικά, η δομή του δικτύου δείχνει ότι η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων λειτουργεί ως κεντρικός σύνδεσμος μεταξύ των τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων, των πρακτικών γεωργικής άρδευσης, της διαχείρισης των υδάτινων πόρων και των στόχων βιωσιμότητας. Οι ισχυρές διασυνδέσεις μεταξύ αυτών των θεμάτων υποδηλώνουν ότι η σύγχρονη έρευνα προσεγγίζει όλο και περισσότερο την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων ως μια ολοκληρωμένη λύση για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας και τη βιώσιμη γεωργική παραγωγή. Για την ποσοτική υποστήριξη της χαρτογράφησης, στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται οι λέξεις-κλειδιά με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης, οι οποίες αποτυπώνουν τους κυρίαρχους ερευνητικούς άξονες της βιβλιογραφίας.



Σχήμα 2 Δίκτυο συνεμφάνισης λέξεων-κλειδιών της βιβλιογραφίας σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων για γεωργικούς σκοπούς, όπως δημιουργήθηκε με το λογισμικό VOSviewer.

Πίνακας 10 Οι σημαντικότερες λέξεις-κλειδιά της βιβλιογραφίας βάση της συχνότητας εμφάνισης.

Λέξη -Κλειδί	Εμφανίσεις
Wastewater treatment	1948
Wastewater reclamation	1614
Wastewater reuse	1439
Water conservation	1031
Effluents	610
Sustainable Development	326
Heavy metals	236
Nutrients	222
Water scarcity	209

5.3 Συζήτηση

Η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων για γεωργικούς σκοπούς αποτελεί μία από τις πλέον υποσχόμενες στρατηγικές αντιμετώπισης της αυξανόμενης λειψυδρίας και της πίεσης που ασκείται στους διαθέσιμους υδατικούς πόρους. Η γεωργία, ως ο μεγαλύτερος καταναλωτής γλυκού νερού παγκοσμίως, καλείται να υιοθετήσει βιώσιμες πρακτικές διαχείρισης νερού, ώστε να διασφαλιστεί η μελλοντική επισιτιστική ασφάλεια και η προστασία του περιβάλλοντος.

Η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην εξοικονόμηση υδατικών πόρων, στη μείωση της άντλησης υπόγειων υδάτων και στην ενίσχυση της αγροτικής παραγωγής, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονα φαινόμενα ξηρασίας και περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού. Παράλληλα, η παρουσία θρεπτικών στοιχείων στα επεξεργασμένα λύματα δύναται να μειώσει την ανάγκη χρήσης χημικών λιπασμάτων, ενισχύοντας περαιτέρω τη βιωσιμότητα των γεωργικών συστημάτων.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση κατέδειξε ότι η ασφαλής εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλων τεχνολογιών επεξεργασίας, αυστηρών ποιοτικών

προδιαγραφών και αποτελεσματικών συστημάτων παρακολούθησης. Παρά τα σημαντικά οφέλη, εξακολουθούν να υφίστανται ζητήματα που σχετίζονται με την προστασία της δημόσιας υγείας, τη συσσώρευση ρύπων στο έδαφος και την κοινωνική αποδοχή της πρακτικής, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή ολοκληρωμένων στρατηγικών διαχείρισης κινδύνου.

Η ανάλυση διεθνών παραδειγμάτων έδειξε ότι χώρες όπως το Ισραήλ, η Ισπανία και η Κύπρος έχουν αναπτύξει επιτυχημένα συστήματα επαναχρησιμοποίησης, αποδεικνύοντας ότι η αξιοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων μπορεί να αποτελέσει βασικό εργαλείο βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων. Αντίστοιχα, στην Ελλάδα, παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί στο θεσμικό πλαίσιο και στις υποδομές επεξεργασίας λυμάτων, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά περιθώρια περαιτέρω αξιοποίησης των διαθέσιμων εκροών.

Τα αποτελέσματα της βιβλιομετρικής ανάλυσης με χρήση του λογισμικού VOSviewer επιβεβαίωσαν ότι η διεθνής επιστημονική έρευνα επικεντρώνεται κυρίως στους άξονες της επεξεργασίας λυμάτων, της επαναχρησιμοποίησης νερού, της άρδευσης, της προστασίας της ποιότητας των υδάτων και της βιώσιμης διαχείρισης των φυσικών πόρων. Η έντονη διασύνδεση των θεματικών αυτών πεδίων υποδηλώνει ότι η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων δεν αντιμετωπίζεται πλέον ως μια μεμονωμένη τεχνολογική πρακτική, αλλά ως αναπόσπαστο στοιχείο της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης.

Συνολικά, η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων συνιστά μια ρεαλιστική και περιβαλλοντικά βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων. Η περαιτέρω ανάπτυξη τεχνολογιών επεξεργασίας, η ενίσχυση της ενημέρωσης του κοινού και η αποτελεσματική εφαρμογή του θεσμικού πλαισίου αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην ευρύτερη υιοθέτηση της πρακτικής τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.

Βιβλιογραφία

Aftab, M., Haq Khan, Z. U., Shah, N. S., Ullah, F., & Khasim, S. (2025). Advanced oxidation processes for pesticide degradation: A comprehensive review on the role of nano zero-valent metals and persulfate activation. *RSC Advances*, 15(48), 40619–40654.

<https://doi.org/10.1039/D5RA06043E>

Angelakis, A., & Gikas, P. (2014). *Water reuse: Overview of current practices and trends in the world with emphasis on EU states*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Water-reuse-%3A-Overview-of-current-practices-and-in-Angelakis-Gikas/510418e8c0ba45079124a0c8f28e6186fd017d38>

Gikas/510418e8c0ba45079124a0c8f28e6186fd017d38

Angelakis, A. N., Asano, T., Bahri, A., Jimenez, B. E., & Tchobanoglous, G. (2018). Water Reuse: From Ancient to Modern Times and the Future. *Frontiers in Environmental Science*, 6.

<https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00026>

Asano, T., Burton, F. L., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*.

<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2329695>

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture*. Food and Agriculture Organization of the UN.

Bai, Y., Shan, F., Zhu, Y., Xu, J., Wu, Y., Luo, X., Wu, Y., Hu, H.-Y., & Zhang, B. (2020). Long-term performance and economic evaluation of full-scale MF and RO process – A case study of the changi NEWater Project Phase 2 in Singapore. *Water Cycle*, 1, 128–135.

<https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.09.001>

Dolnicar, S., Hurlimann, A., & Grün, B. (2011). What affects public acceptance of recycled and desalinated water? *Water Research*, 45(2), 933–943.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.09.030>

European Commission. Directorate General for the Environment. & Technical University of Munich. (2017). *Characterization of unplanned water reuse in the EU: Final report*. Publications Office. <https://doi.org/10.2779/597701>

Evaluation of Sparta's municipal wastewater treatment plant's effluent as an irrigation water source according to Greek Legislation. (n.d.). *ResearchGate*. Retrieved May 25, 2025, from https://www.researchgate.net/publication/280568229_Evaluation_of_Sparta's_municipal_wastewater_treatment_plant's_effluent_as_an_irrigation_water_source_according_to_Greek_Legislation

Friends of the Arcata Marsh. (n.d.). Sustainable wastewater treatment: A conventional and a natural treatment system. <https://www.arcatamarshfriends.org/wp-content/uploads/wastewater-brochure.pdf>

Guerreiro, C., González Ortiz, A., Leeuw, F. de, Colette, A., European Environment Agency, & European Topic Centre on Air Pollution and Climate Change Mitigation (ETC/ACM) (Eds.). (2018). *Air quality in Europe: 2018 report*. Publications Office. <https://doi.org/10.2800/285124>

Haas, C. N., Gerba, C. P., & Rose, J. B. (2014). *Quantitative microbial risk assessment* (Second edition). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118910030>

Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1st ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Kanteraki, Elsaria, Kokkinos, Lau, Hilge, Steinmetz, & Kalavrouziotis. (2025). Current Operational State of Wastewater Treatment Plants in Greece: A Nationwide Survey. *International Journal of Water and Wastewater Treatment*, 11(2). <https://doi.org/10.16966/2381-5299.200>

Lazarova, V., & Bahri, A. (2015). *Water reuse for irrigation—Agriculture, Landscapes, and Turf Grass* [Dataset].

Lazarova, V., Choo, K.-H., & Cornel, P. (2012). *Water-Energy Interactions in Water Reuse*. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780400662>

- Lonigro, A., Rubino, P., Lacasella, V., & Montemurro, N. (2016). Faecal pollution on vegetables and soil drip irrigated with treated municipal wastewaters. *Agricultural Water Management*, 174, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.001>
- Lopes, T. S. D. A., Heßler, R., Bohner, C., Athayde Junior, G. B., & De Sena, R. F. (2020). Pesticides removal from industrial wastewater by a membrane bioreactor and post-treatment with either activated carbon, reverse osmosis or ozonation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 104538. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104538>
- Lopez, A., Pollice, A., Lonigro, A., Masi, S., Palese, A. M., Cirelli, G. L., Toscano, A., & Passino, R. (2006). Agricultural wastewater reuse in southern Italy. *Desalination*, 187(1–3), 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.091>
- Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L. D., Hai, F. I., Zhang, J., Liang, S., & Wang, X. C. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 473–474, 619–641. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.065>
- Nguyen, M.-L., Nakhjiri, A. T., Kamal, M., Mohamed, A., Algarni, M., Yu, S. T., Wang, F.-M., & Su, C.-H. (2022). State-of-the-Art Review on the Application of Membrane Bioreactors for Molecular Micro-Contaminant Removal from Aquatic Environment. *Membranes*, 12(4), 429. <https://doi.org/10.3390/membranes12040429>
- Organisation mondiale de la santé (Ed.). (2006). *Working together for health: The World health report 2006*. World health organization.
- Organisation mondiale de la santé (Ed.). (2017). *World health statistics 2017: Monitoring health for the SDGs sustainable development goals*. World health organization.
- Pedrero, F., Kalavrouziotis, I., Alarcón, J. J., Koukoulakis, P., & Asano, T. (2010). Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture—Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management*, 97(9), 1233–1241. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.03.003>
- Plakas, K. V., & Karabelas, A. J. (2012). Removal of pesticides from water by NF and RO membranes—A review. *Desalination*, 287, 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.003>
- Po, M., Kaercher, J. D., & Nancarrow, B. E. (2003). *LITERATURE REVIEW OF FACTORS INFLUENCING PUBLIC PERCEPTIONS OF WATER REUSE*.

- Po, M., Nancarrow, B., Leviston, Z., Porter, N., Syme, G., & Kaercher, J. (2005). Predicting Community Behaviour in Relation to Wastewater Reuse What Drives Decisions to Accept or Reject? *Science*.
- Prosser, R. S., Hoekstra, P. F., Gene, S., Truman, C., White, M., & Hanson, M. L. (2020). A review of the effectiveness of vegetated buffers to mitigate pesticide and nutrient transport into surface waters from agricultural areas. *Journal of Environmental Management*, 261, 110210. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110210>
- Salgot, M., Priestley, G. K., & Folch, M. (2012). Golf Course Irrigation with Reclaimed Water in the Mediterranean: A Risk Management Matter. *Water*, 4(2), 389–429. <https://doi.org/10.3390/w4020389>
- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301–310. <https://doi.org/10.1038/nature06599>
- Shin, E., UNESCO, & UNESCO (Eds.). (2020). *Water reuse within a circular economy context*. UNESCO.
- Tang, Z., Wood, J., Smith, D., Thapa, A., & Aryal, N. (2021). A Review on Constructed Treatment Wetlands for Removal of Pollutants in the Agricultural Runoff. *Sustainability*, 13(24), 13578. <https://doi.org/10.3390/su132413578>
- Tchobanoglous, G., Stensel, D. H., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M., Bowden, G., Pfrang, W., Metcalf & Eddy, Inc, & Albert Einstein College of Medicine (Eds.). (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (Fifth Edition). McGraw-Hill Education.
- The State of Food and Agriculture 2020*. (2020). FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>
- Tsagarakis, K. P., Dialynas, G. E., & Angelakis, A. N. (2004). Water resources management in Crete (Greece) including water recycling and reuse and proposed quality criteria. *Agricultural Water Management*, 66(1), 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2003.09.004>
- UNESCO (Ed.). (2017). *Wasterwater: An untapped resource*. Unesco.
- Vergine, P., Salerno, C., Libutti, A., Beneduce, L., & Et., A. (2017). Closing the water cycle in the agro-industrial sector by reusing treated wastewater for irrigation. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.239>

Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E. A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C. T., & Barry, D. A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, 51, 3–26.
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.004>

Ελληνική Δημοκρατία (2011). ΚΥΑ οικ.145116/2011. Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις. *ΦΕΚ Β' 354/08.03.2011*.